

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Miroslav Sojka**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika
Téma: **Spolehlivost elektroenergetické sítě v souvislosti s rekonfigurací**
Electric Power Network Reliability Considering Reconfiguration

Zásady pro vypracování:

Metody spolehlivostních výpočtů
Testovací sítě pro výpočty spolehlivosti elektroenergetických sítí
Model sítě IEEE RTS v programu KomplexSpoleh
Spolehlivostní výpočet variant zapojení sítě
Methods of Reliability Calculation
Test Networks for Power Networks Reliability Calculations
IEEE Reliability Test System in the KomplexSpoleh Program
Reliability Calculation of Network Interconnection Variants

Seznam doporučené odborné literatury:


dle doporučení vedoucího DP

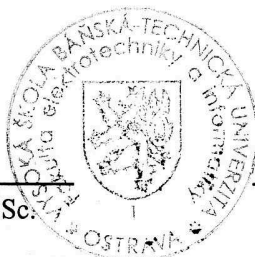
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

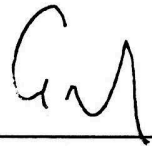
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Tadeusz Sikora, Ph.D.**

Datum zadání: 30.11.2011

Datum odevzdání: 04.05.2012


prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky 410

Spolehlivost elektroenergetické sítě v souvislosti s rekonfigurací
Electric Power Network Reliability Considering Reconfiguration

2012

Miroslav Sojka

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě 4. května 2012

.....

Bc. Miroslav Sojka

Poděkování

Touto formou bych chtěl poděkovat panu ing. Tadeuszi Sýkorovi, Ph.D za cenné rady, které mi poskytl během vypracování této práce.

Anotace

Tato práce se zabývá problematikou spolehlivosti elektroenergetických sítí v souvislosti s rekonfigurací. V úvodních kapitolách jsou probrány základní teoretické aspekty spolehlivosti. Podrobněji jsou dále uvedeny metody výpočtů spolehlivosti jednoduchých sítí v ustáleném stavu. V praktické části jsou uvedeny tři spolehlivostní sítě a jejich ukazatele spolehlivosti, používané pro mezinárodní srovnávání výsledků různými výzkumnými skupinami (RBTS, RTS 79, RTS 96). Dále byl vytvořen spolehlivostní model sítě RTS 79 a zkoumala se jeho spolehlivost pomocí programu KomplexSpoleh v souvislosti s vlivem souběhu vedení. Výsledky byly vyneseny jako grafické závislosti a hodnoty veškerých simulací jsou dodány na přiloženém disku.

Klíčová slova

Spolehlivost, provozuschopný stav, poruchovost, metody spolehlivosti, porucha, údržba, intenzita poruch, intenzita údržby, doba poruchy, doba údržby, KomplexSpoleh, RTS 79, RTS 96, ČEZ 22/80, souběh vedení, rekonfigurace.

Abstrakt

This thesis deals with the reliability of electricity networks in the considering of the reconfiguration. The introductory chapter discusses the basic theoretical aspects of reliability. More details are given below calculate the reliability of the method of simple networks in steady state. The practical part describes three network reliability and reliability indicators used for international comparisons of results by different research groups (RBTS, RTS 79 RTS 96). Then a network reliability model of RTS 79 and examined its reliability using KomplexSpoleh in connection with the influence of parallel lines. The results were plotted as graphical dependence and values of all simulations are supplied on the enclosed disk.

Key words

Reliability, service availability, forced outage rate, methods of reliability, failure, maintainance, failure rate, Scheduled maintenance, down duration, down maintainance, KomplexSpoleh, RTS 79, RTS 96, ČEZ 22/80, tie line, reconfiguration.

Seznam zkratk a symbolů

ASAI	střední ukazatel spolehlivosti	
BTU	British thermal unit	
Bus	přípojnice	
CAIDI	průměrná doba trvání výpadku u odběratele (min.výpadek ⁻¹)	
Con	trvalé zatížení	(MVA)
ČEZ 22/80	směrnice ČEZ, týkající se zjišťování spolehlivosti sítí	
D _i	stanice bez napětí	
DC	stejnoseměrný přenos	
DTS	distribuční trafostanice	
ERÚ	Energetický regulační úřad	
f (t)	hustota pravděpodobnosti	(1/rok)
FOR	poruchovost - forced outage rate	
HLI	hierarchická úroveň jedna	
HLII	hierarchická úroveň dva	
ID	identifikátor větví	
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	
k	činitel souběhu	
k _v	činitel prostoje	
k _p	činitel pohotovosti	
λ(t)	intenzita poruch	(1/rok)
λ _G	četnost poruch	(výpadek.rok ⁻¹)
λ _p	intenzita poruch	(rok ⁻¹)
λ _t	přechodná četnost výpadku	
λ _U	intenzita údržby	(rok ⁻¹)
LOLE	předpoklad ztráty zatížení – Loss of Load Expectation	(hod/rok)
LOEE	předpoklad ztráty energie – Loss of Energy Expectation	(MWh/rok)
L _s	celkový instalovaný výkon	(kVA)
μ	intenzita oprav	(rok ⁻¹)
m	střední doba bezporuchového chodu	
MC	metoda Monte-Carlo	
MTTF	střední doba bezporuchového chodu	
MTTR	střední doba odpravy	
N _i	počet připojených odběratelů v bodu „i” sítě	
n _j	počet postižených odběratelů	
P	výkon	(W)
P _{MAX}	maximální výkon	
PPDS	pravidla provozování distribučních soustav	
PV	označení výrobní přípojnice	
PQ	označení odběrové přípojnice	
R (t)	pravděpodobnost bezporuchového stavu	
RBTS	testovací síť (Roy Billinton Test System)	

REAS	databáze poruchových ukazatelů	
RTS	spolehlivostní testovací systém (Reliability Test System)	
RTS 79	spolehlivostní testovací systém 79	
RTS 96	spolehlivostní testovací systém 96	
SAIDI	průměrná doba trvání výpadku	(min.rok ⁻¹)
SAIFI	průměrná intenzita poruch	(výpadek.rok ⁻¹)
S _s	celkový počet DTS	
STE	krátkodobé zatížení vedení	(MVA)
τ	střední doba trvání poruchy	
T _{DOD}	celková doba dodávky v období	(h)
τ _G	doba trvání jednoho výpadku	(min.výpadek ⁻¹)
τ _{GV}	doba trvání všech výpadků	(min.rok ⁻¹)
τ _P	doba opravy	(h)
τ _{TM}	manipulační čas	(h)
τ _U	doba údržby	(h)
t _i	střední doba výpadku	(h)
t _p	střední doba do poruchy	(h)
T _{MAX}	doba využití maxima	(h.rok ⁻¹)
T _{VYP}	celková doba výpadku v období	(h)
W _{NED}	nedodaná energie	(kWh.rok ⁻¹)
Q (t)	pravděpodobnost poruchy	
x	střední hodnota	
Z _i	počet postižených zákazníků	

Tyto symboly a zkratky jsou platné jen tehdy, není-li v příslušném textu uvedeno jinak. Jedná se především o symboly a zkratky označené stejným znakem.

Úvod.....	1
1 Teoretický rozbor spolehlivosti elektroenergetických sítí.....	2
1.1 Základní pojmy a ukazatele	2
1.2 Rozdělení poruch	4
1.2.1 Klasifikace poruch.....	4
1.2.2 Vanová křivka.....	5
1.3 Vyjádření základních ukazatelů spolehlivosti.....	5
1.3.1 Statistický odhad.....	6
1.3.2 Rozdělení používaná v energetice	7
2 Metody výpočtu pro spolehlivostní systémy	9
2.1 Metoda spolehlivostních schémat	9
2.1.1 Sériové zapojení prvků	10
2.1.2 Paralelní zapojení prvků	10
2.1.3 Aplikace exponenciálního rozložení.....	11
2.2 Metodika výpočtu spolehlivosti dle směrnice Čez 22/80	13
2.2.1 Sériové zapojení	14
2.2.2 Paralelní zapojení (horká rezerva)	15
2.2.3 Paralelní zapojení (studená rezerva).....	15
2.3 Metody řešení pro složité systémy	16
2.4 Globální ukazatele spolehlivosti	17
2.4.1 Varianta omezení dodávky odběratelům	18
2.4.2 Varianta omezení instalovaného výkonu a varianta omezení distribučních trafostanic ..	19
2.4.3 Nedodaná energie	20
2.4.4 Další používané ukazatele	20
2.5 Simulační metoda Monte-Carlo (MC)	21
2.5.1 Výhody simulační metody.....	23
2.5.2 Nevýhody MC	23
3 Testovací sítě pro výpočet spolehlivosti elektroenergetických sítí	24
3.1 Testovací síť RBTS.....	24
3.1.1 Popis RBTS	24
3.1.2 Výrobní systém.....	26
3.1.3 Dodatečné výrobní jednotky.....	26
3.1.4 Přenosový systém	27
3.1.5 Výsledky získané ze zahraniční literatury pomocí metody síťového toku	30
3.2 Testovací síť RTS-79	31
3.2.1 Popis systému	31
3.2.2 Výrobní systém.....	31
3.2.3 Přenosový systém	32
3.3 Testovací síť RTS – 96	38
3.3.1 Popis RTS 96.....	38
3.3.2 Výrobní systém.....	40
3.3.3 Přenosový systém	40

3.3.4	Staniční komponenty	41
4	Model sítě v IEEE RTS v programu KomplexSpoleh.....	42
4.1	Popis programu KomplexSpoleh	42
4.2	Mode sítě RTS 79	43
4.2.1	Vstupní údaje.....	43
4.2.2	Vstupní spolehlivostní hodnoty podle ČEZ 22/80.....	44
4.2.3	Varianta s uvažováním souběhu vedení	44
4.2.4	Varianta bez uvažování souběhu vedení.....	47
4.2.5	Model sítě vytvořený v sešitu Excel.....	49
5	Spolehlivostní výpočet variant zapojení sítě	50
5.1	Použití poruchových ukazatelů publikovaných v RTS 79	50
5.1.1	Porovnání spolehlivosti jednotlivých variant	52
5.2	Použití poruchových ukazatelů podle ČEZ 22/80.....	52
5.3	Vyhodnocení jednotlivých variant.....	59
	Závěr.....	61
	Literatura a ostatní zdroje.....	62
	Seznam obrázků	63
	Seznam tabulek	64
	Seznam příloh.....	65

Úvod

Od energetických systémů se očekává vysoký stupeň spolehlivosti, proto je důležitým aspektem již návrh a provoz energetického systému. Vhodná opatření lze popsat např. v propojení energetické soustavy podle požadované úrovně. Z hlediska spolehlivosti je systém charakterizován poruchovými ději, které lze analyzovat a přiřadit jednotlivým prvkům. Jestliže budeme uvažovat pro systém nejnepříznivější podmínky (např. nejdelší dobu trvání výpadku, atd.) dostaneme bezpečné a spolehlivé systémy. Naproti tomu jsou značně vysoké náklady na jejich vybudování a provoz. Ovšem na druhé straně nemůžeme uvažovat systémy nebezpečné a nespolehlivé. Proto, tam kde je to možné se hledá kompromis při zachování nezbytné spolehlivostní úrovně. Funkce napájecí sítě je tedy uspokojit zatížení soustavy v rozumné ceně a s rozumnou zárukou nepřetržitosti a kvality elektrické energie. Tato tzv. "rozumná záruka" je základem pro široký okruh studií obecně určené jako stanovení spolehlivosti

Spolehlivost dodávky elektrické energie je nutností především pro zajištění plynulého chodu na úrovni většiny průmyslových odvětví, a také úrovně obyvatelstva. Výpadky dodávek elektrické energie mohou mít nemalé důsledky (podle charakteru odběratelů) pro společnost. Podle rozsáhlosti a vážnosti výpadku vznikají národohospodářské škody s důsledky na životní úroveň obyvatelstva. S neustálým růstem instalovaných výkonů elektrizačních soustav se zvyšují nároky na spolehlivost a řízení těchto rozsáhlých systémů. Základní techniky pro hodnocení spolehlivosti lze rozdělit z hlediska základních segmentů energetického systému, které jsou výroba, přenos a distribuce. Tyto funkční zóny tvoří řadu hierarchických zón nebo úrovní

Tímto problémem se začala zabývat IEEE skupina použitím spolehlivostních metod (APM), která v roce 1979 publikovala IEEE spolehlivostní testovací systém (RTS) [10]. To je rozumně komplexní systém obsahující zavedená data pro výrobu, přenos a odběr energie. V této práci je příspěvek je IEEE RTS určený k použití pravděpodobnostních metod, určený k srovnání, hodnocení a testování širokého okruhu generovaných dat výrobních jednotek, přenosových prvků, jejich kombinací a také počítačových programů.

Naplní této práce je vytvořit souhrn spolehlivostních testovacích sítí, vytvořit spolehlivostní model testovací sítě a provést jeho analýzu v souvislosti s rekonfigurací pro různé případy, pomocí programu KomplexSpoleh vyvinutý na VŠB-TUO fakultě elektrotechniky a informatiky.

1 Teoretický rozbor spolehlivosti elektroenergetických sítí

Teorie spolehlivosti definuje metody a prostředky pro číselné vyjádření schopnosti objektu plnit předem určenou funkci. Číselné hodnoty ukazatelů spolehlivosti umožňují posuzovat úroveň kvality objektu, která je definována příslušným ukazatelem, kterému je přiřazena jmenovitá hodnota. Většina pojmů ve spolehlivosti může být vztažena buď jednotce času a nebo k veličinám, jako např. počet cyklů apod.

1.1 Základní pojmy a ukazatele

Spolehlivost – je chápána jako komplexní vlastnost objektu či zařízení, spočívající ve schopnosti plnit požadované funkce v daných mezích a čase při zachování stanovených provozních hodnot ukazatelů podle stanovených technických podmínek.

Bezporuchovost – spočívá ve vlastnosti objektu nebo prvku plnit (či neplnit) požadované funkce při dodržení stanovených parametrů po stanovenou dobu. Od této funkce se odvíjí provozuschopný a provozu neschopný stav.

Porucha – je jev mající za následek ukončení provozuschopného stavu. Její příčiny a dělení jsou níže, viz klasifikace poruch kapitola 1.2.1.

Údržba – je činnost prováděná za účelem udržení objektu v provozuschopném stavu. Spočívá v pravidelné kontrole stavu objektu a popřípadě provedení preventivních zásahů.

Oprava – je činnost za účelem navrácení objektu do provozuschopného stavu

Spolehlivost popisují vlastnosti jako je bezporuchovost, životnost, udržovatelnost, opravitelnost, pohotovost, skladovatelnost a bezpečnost. Každé této vlastnosti přísluší určitý ukazatel. Například k poruchovosti se váže ukazatel pravděpodobnosti poruchy, intenzita poruch, střední doba do poruchy atd. Podrobné rozřazení uvádí tabulka I v příloze A.

Pravděpodobnost bezporuchového provozu $R(t)$ – znázorňuje pravděpodobnost, že porucha v intervalu sledovaného období nenastane. Stanoví se poměrem porušených objektů v daném časovém intervalu k celkovému počtu objektů na začátku sledovaného intervalu. Předpokládáme vznik poruchy v náhodném okamžiku ξ .

$$R(t) = P(\xi > t) \quad (1.1.1)$$

Pravděpodobnost poruchy $Q(t)$ – vyjadřuje se jako pravděpodobnost vzniku poruchy v určeném časovém intervalu. Je to poměr počtu poruch (a po poruše neopravených) objektů ve sledovaném intervalu k celkovému počtu objektů na začátku intervalu.

$$Q(t) = P(\xi \leq t) = 1 - R(t) \quad (1.1.2)$$

Funkční hodnoty $R(t)$ a $Q(t)$ v rozmezí $t \in (0, \infty)$ jsou kladná bezrozměrná čísla. Zpravidla předpokládáme $R(0) = 1$ a $R(\infty) = 0$. Funkce $R(t)$ je nerostoucí funkce času, $Q(t)$ je neklesající funkce času.

Hustota pravděpodobnosti poruchy – je pravděpodobnost, kdy může dojít k poruše objektu za malý časový interval po daném okamžiku. Hustotu pravděpodobnosti poruchy $f(t)$ získáme derivací distribuční funkce $Q(t)$

$$f(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (1/\text{čas}) \quad (1.1.3)$$

Intenzita poruch $\lambda(t)$ – udává bezporuchovost systému, definovaná poměrem hustoty poruch k pravděpodobnosti bezporuchového provozu. Udává počet poruch za časové období. U náhlých poruch bývá konstantní a u poruch postupných způsobených např. opotřebením s časem stoupá.

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (1/\text{čas}) \quad (1.1.4)$$

Střední doba bezporuchového provozu – u neobnovovaných objektů je střední dobou do poruchy (MTTF), u obnovovaných objektů střední doba mezi poruchami (MTBF).

$$m = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (1.1.5)$$

Intenzita oprav – určuje se pro obnovované objekty zcela analogicky jako intenzita poruch (popsaná funkcí hustoty oprav)

Střední doba opravy (MTTR) – je střední hodnota časového intervalu od začátku opravy do doby provozuschopnosti. Určuje se pro obnovované objekty.

[1][2]

Zkoumaný celek se v průběhu sledovaného kalendářního období může nacházet ve stavech:

- Provoz
- Zálaha
- Porucha
- Plánovaný prostoj

1.2 Rozdělení poruch

1.2.1 Klasifikace poruch

Porucha se projevuje jako částečná nebo úplná ztráta schopnosti objektu plnit požadovanou funkci. Soubor poruch určuje rozsah poruchy nebo porouchaný díl, údaje za jakých podmínek porucha vznikla, projev poruchy jakož to příčiny a důsledky, a také časový průběh atd.

Podle podmínek vzniku dělíme poruchy:

- a) Porucha z vnějších příčin – je způsobena nedodržáním stanovených podmínek provozu a předpisů (např. obsluha, údržba, špatná manipulace).
- b) Porucha z vnitřních příčin – může nastat vlastní nedokonalostí daného prvku při zachování provozních podmínek. Projevují jako poruchy časté většinou na počátku provozního období, jejich výskyt s časem klesá. Nebo poruchy dožitím vznikající opotřebením a stárnutím, kde jejich výskyt s časem roste.

Podle výskytu v čase a rozsahu poruchy:

- a) Náhlá porucha – projevuje se jako prudká změna jednoho nebo více parametrů objektu. Může být klasifikovaná podle rozsahu poruchy jako *úplná (havarijní)* a zabraňuje objektu plnit stanovenou funkci. Charakter těchto poruch je obvykle nepředvídatelný.
- b) Postupná porucha – projevuje se postupně systematicky (např. stárnutí, opotřebení). Charakterizuje *částečnou (degradační)* poruchu. Hodnota parametru se mění v časovém intervalu postupně bez větších změn, a po určité době dosáhne mezního stavu (poruchy).

V souvislosti s jinými poruchami:

- a) Závislá vznikne následkem jiné poruchy, nezávislá nikoliv.

Podle doby trvání

- a) Trvalá porucha – odstraní se nahrazením poškozeného prvku nebo jeho opravou
- b) Dočasná porucha – mohou samovolně vymizet nebo trvat po dobu působení vnějšího vlivu

[3]

1.2.2 Vanová křivka

Pro posouzení spolehlivosti jako chování objektu se používají různé modely zákonů rozdělení poruch. K určení bezporuchovosti obecného systému se využívá charakteristiky závislosti intenzity poruch na době provozování, tzv. vanová křivka. Časový průběh této závislosti je rozdělen do tří časových úseků.

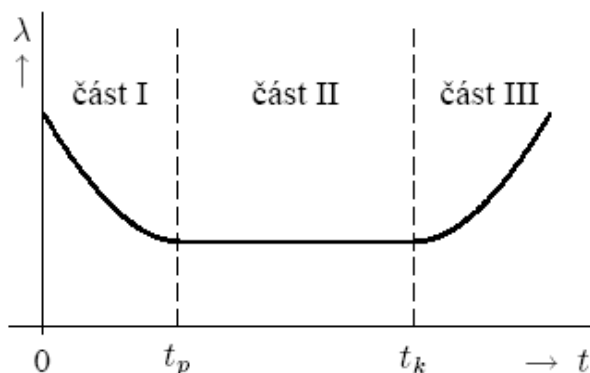
I. Období časných poruch

V čase $t = 0$ až $t = t_p$ křivka intenzity poruch klesá. V tomto intervalu se objekt nachází v období počátečního provozu. Toto zvýšení poruch může být v důsledku výrobních vad, chybného návrhu projektu, nesprávné montáže a podobně.

II. Období normálního využívání V druhém časovém úseku se včasnou a vhodnou údržbou využije nejnižší, přibližně konstantní intenzity poruch. Poruchy vznikají náhodně většinou z vnějších příčin. V tomto intervalu je četnost poruch nejmenší za dobu života daného objektu.

III. Období poruch dožitím

Ve třetím úseku intenzita poruch stoupá stárnutím a opotřebením zařízení. V určitých případech může chybět období 1 pro pečlivě zaběhnuté zařízení přímo výrobcem. Nebo např. po vyřazení zařízení před začátkem cyklu stárnutí nebo opotřebení může chybět křivka 3 části.



Obr. 1.1. časový průběh intenzity poruch

[1][4]

1.3 Vyjádření základních ukazatelů spolehlivosti

Časové průběhy základních ukazatelů spolehlivosti se získávají ze zkoušek velkého počtu objektů, nebo z údajů o provozu za dlouhou dobu, tedy statisticky. Někdy je možné tyto průběhy odvodit z materiálových parametrů a ze znalosti poruchových mechanismů, tedy deterministicky.

Další možností je porovnat průběh rozdělení poruch s některým zákonem rozdělení poruch odvozených z určitého pravděpodobnostního modelu. Pak stačí určit jeden nebo několik parametrů zákona rozdělení a bezporuchovost udat těmito parametry (parametrická metoda). Zákon rozdělení se volí podle průběhu charakteristiky poruch. Pro odhad parametrů se nejčastěji používá metoda největší věrohodnosti, nebo největších čtverců. [1]. Máme tedy dvě možnosti jak určit základní ukazatele spolehlivosti. Podle toho, jaké jsou k dispozici požadované údaje.

a) **Empirická spolehlivost:** vstupní údaje jsou získávány sledováním poruchovosti elektroenergetické soustavy nebo její částí. Pro empirickou spolehlivost je zapotřebí mít k dispozici údaje o chodu a poruchách prvků, které se ve spolehlivostním schématu vyskytují, nebo údaje o prvcích stejného typu, které pracují v podobných provozních podmínkách. S rozsahem databáze roste věrohodnost z ní získaných informací. To znamená mít komplexní údaje o poruchách vypínačů, odpínačů, transformátorů, vedení atd. podle napěťové hladiny a typu prvku. Například kromě počtu poruch a střední doby poruchy také informace o celkovém rozsahu sledovaného zařízení jako celkovou délku vedení a její parametry. [4]

b) **Apriorní spolehlivost:** vstupní údaje jsou určeny předem, aniž známe údaje o poruchách prvků stejného typu. Spolehlivostní údaje (ukazatele) určuje přímo výrobce. To znamená, že pouze z těchto údajů je možné určit optimální dobu mezi revizemi, intenzitu poruch, atd. Otázka apriorní spolehlivosti prvků energetické soustavy nemůže být řešena obecně pro všechny prvky, jelikož má každý prvek jinou funkci, konstrukci. Proto je nutno řešit tuto problematiku pro každou část energetického zařízení zvlášť. [4]

1.3.1 Statistický odhad

Vstupní informace potřebné k určení spolehlivostních charakteristik se získávají sběrem dat a jejich statistickým zpracováním. Aby byla empirická metoda statisticky významná, vyžadují se záznamy o poruchách za mnoho let zpět. Pomocí statisticky získaných dat za dlouhou dobu můžeme definovat základní ukazatele bezporuchovosti. Zaznamenávají se doby a počty poruch v intervalech a z těchto vstupních hodnot se pak dají určit spolehlivostní charakteristiky. Hodnoty charakteristiky se mohou zpracovat do grafů a proložit křivkami.

Pro pravděpodobnost bezporuchového stavu neobnovovaného zařízení platí vztah:

$$\hat{R}(t) = \frac{N(t)}{N_0} \quad (1.3.1.1)$$

Pravděpodobnost poruchy:

$$\hat{Q}(t) = \frac{N_0 - N(t)}{N_0} \quad (1.3.1.2)$$

Hustota pravděpodobnosti poruchy (relativní četnost)

$$\hat{f}(t) = \frac{\Delta N}{\Delta t \cdot N_0} \quad (1.3.1.3)$$

Kde pro ΔN platí:

$$\Delta N = N_0 - N(t) \quad (1.3.1.4)$$

Intenzita poruch:

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{\Delta N}{\Delta t \cdot N(t)} \quad (1.3.1.5)$$

Statistický odhad střední doby bezporuchového provozu

$$\hat{m} = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} t_i \quad (1.3.1.6)$$

kde:

N_0 počet stejných pozorovaných zařízení v čase $t = 0$,

$N(t)$ počet zařízení v provozuschopném stavu po uplynutí doby t ,

ΔN počet zařízení ve stavu neschopných provozu po uplynutí určité doby,

Δt interval, ve kterém nastala porucha na zařízení od t do $t + \Delta t$ (délka sledovaného období),

t_i je okamžik vzniku poruchy jednotlivých objektů,

$\Delta N/\Delta t$ počet poruch objektů za jednotku času.

S větší hodnotou N_0 se statistické odhady blíží pravděpodobnostním ukazatelům. Častěji používaný způsob zpracování dat, u kterého aproximujeme obdržené závislosti je pomocí vhodných zákonů rozdělení poruch.

[2] [1]

1.3.2 Rozdělení používaná v energetice

Zákon rozdělení poruch se volí podle průběhu charakteristických poruch. Dále kompletně popisuje charakteristiky bezporuchovosti, takže použitím těchto zákonů o rozdělení můžeme z udaných parametrů dopočítat ostatní veličiny bezporuchovosti.

Teorii spolehlivosti se více uplatňují pro spojitou náhodnou proměnnou (porucha vznikne v náhodném čase) rozdělení exponenciální, Weibullovo, normální, logaritmicko-normální a některé jejich kombinace. Pro diskrétní náhodnou proměnnou (porucha pouze v činnosti zařízení) se uplatňují především binomické a Poissonovo rozdělení. V diplomové práci nebudou rozebírané všechny rozdělení, ale jen zmínkou exponenciální a Weibullovo rozdělení. [1]

1.3.2.1 Exponenciální rozdělení

Je nejpoužívanější rozdělení, určeno jedním parametrem λ s konstantní intenzitou poruch. Toto rozdělení nemůže modelovat kompletní průběh intenzity vanové křivky, ale jenom její druhé období normálního využívání, v kterém je objekt vystaven jen vnějším vlivům. Nevyužije se období počátečního provozu ani období dožívání. Pro rozdělení platí $\lambda = konst.$, $\lambda > 0$, $t \geq 0$:

$$R(t) = e^{-\lambda \cdot t} \quad (1.3.2.1.1)$$

$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda \cdot t} \quad (1.3.2.1.2)$$

$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (1.3.2.1.3)$$

$$m = \frac{1}{\lambda} \quad (1.3.2.1.4)$$

[1]

1.3.2.2 Weibullovo rozdělení

Charakterizuje rozdělení doby života, doby do poruchy, doby na opravu, doby na prostoje, doby bezporuchovosti a životnosti pro neobnovované objekty. Představuje zobecnění exponenciálního rozdělení se dvěma parametry $m > 0$, $a > 0$ v čase $t \geq 0$. První parametr a závisí na materiálu, namáhání, podmínkách používání. Pro druhý parametr m je jeho velikost dána vhodností použité pro určité období doby života (aproximuje danou část vanové křivky). Proto se často využívá k modelování všech částí vanové křivky, přičemž v každém období má Weibullovo rozdělení jiné parametry. Aby bylo možné stanovit parametry (m, a) , je třeba mít mnohem více údajů než v případě rozdělení exponenciálního. Výsledné vztahy pro uvedené rozložení jsou uvedeny v tabulce II přílohy A. [1][3]

$$Q(t) = 1 - e^{-\frac{t^m}{a}} \quad (1.3.2.2.1)$$

$$R(t) = e^{-\frac{t^m}{a}} \quad (1.3.2.2.2)$$

$$f(t) = \frac{m}{a} \cdot t^{m-1} \cdot e^{-\frac{t^m}{a}} \quad (1.3.2.2.3)$$

$$\lambda(t) = \frac{m}{a} \cdot t^{m-1} \quad (1.3.2.2.1)$$

2 Metody výpočtu pro spolehlivostní systémy

Existuje celá řada metod, kdy se většinou řeší spolehlivost systému při známé spolehlivosti prvků a to jako ustálená funkce (časově nezávislá) nebo časově závislá. Pro ustálenou, časově nezávislou spolehlivost je výhodné použití jednoduchých metod např. metody spolehlivostního schématu, nebo řešení pomocí směrnic ČEZ 22/80. Další možností je použít globální ukazatele spolehlivosti. Stanovení časových průběhů lze výhodně řešit pomocí Makovových procesů.

2.1 Metoda spolehlivostních schémat

Je základní metoda pro výpočet spolehlivosti. Výchozím postupem je sestavit spolehlivostní schéma, ve kterém jsou dílčí prvky popsány spolehlivostními vlastnostmi, a pak postupným zjednodušováním celku je výsledkem jeden prvek, jehož spolehlivost je spolehlivostí celého systému. Na popisu této metodiky je zřejmá souvislost s teorií pravděpodobnosti, kde je využito dvou teoretických extrémů pravděpodobnosti. První jev, který nesmí nastat za žádných okolností má pravděpodobnost výskytu rovna nule, a pro druhý jev, jenž nastane na každém případě je hodnota pravděpodobnosti rovna jedné. Pro řešení různých zapojení prvků je využito pravidla o násobení pravděpodobností. Kde pravděpodobnost výskytu nezávislých jevů, které mohou nastat současně, lze matematicky znázornit jejich vynásobením. [5]

$$P(A, B) = P(A) \cdot P(B) \quad (2.1.1)$$

Základní úvaha:

- Prvky považujeme za neobnovované, dvoustavové (provozeroschopný a neprovozeroschopný stav). Což znamená, že pro n prvků může vzniknout 2^n kombinací
- Přejedod mezi stavy je okamžitý
- Poruchy uvažujeme vzájemně nezávislé. Tento předpoklad neplatí ve všech případech, proto je třeba blokové schéma doplnit o prvky simulující vzájemné ovlivňování.
- Jednotlivé prvky systému jsou spojeny do série nebo paralelně, popř. kombinací těchto dvou zapojení

Výhody metody:

- Spolehlivostní schéma nemusí reálně existovat
- Přehlednost v schématu a postup řešení je matematicky nenáročný
- Nevyžaduje iterační postup
- Přesnost výsledků závisí na přesnosti vstupních parametrů

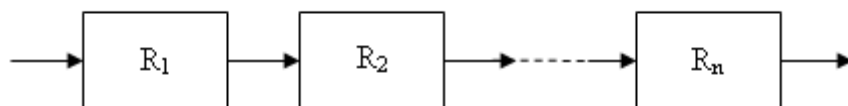
Nevýhody:

- Metoda nezahrnuje bilanci výkonů sítě (přetížení větví)
- Nelze řešit odbočky typu T

[5]

2.1.1 Sériové zapojení prvků

Sériové spojení je takové spojení prvků, při kterém porucha jednoho prvku má za následek poruchy celého systému, i když skutečné zapojení prvků může být odlišné. Uvažujeme zapojení, v němž každý prvek má spolehlivost R_i . Šipky určují směr signálu



Obr. 2.1. Spolehlivostní zapojení prvků v sérii

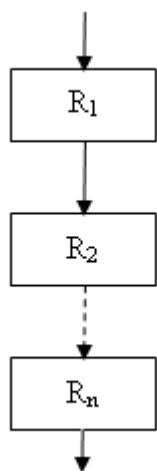
Celková spolehlivost je v tomto případě:

$$R = R_1 \cdot R_2 \cdot \dots \cdot R_n \quad (2.1.1.1)$$

$$R = \prod_{i=1}^n R_i \quad (2.1.1.2)$$

2.1.2 Paralelní zapojení prvků

Systém je v provozuschopném stavu pokud je funkční nejméně jeden prvek. Při poruše jednoho prvku přebírají jeho funkci ostatní prvky. Paralelní systém, který pracuje tehdy, jestliže aspoň jeden prvek je v provozu bez poruchy nazýváme plně redundantním systémem. Částečně redundantním systémem je paralelní systém, v němž musí pracovat určitý počet provozuschopných prvků ze všech prvků systému (r z n prvků musí být provozuschopných).



Pravděpodobnost poruchy je v tomto případě:

$$Q = Q_1 \cdot Q_2 \cdot \dots \cdot Q_n \quad (2.1.2.1)$$

$$Q = \prod_{i=1}^n Q_i \quad (2.1.2.2)$$

Vztah odpovídá spolehlivosti:

$$R = 1 - Q = 1 - \prod_{i=1}^n Q_i \quad (2.1.2.3)$$

Obr. 2.2 Spolehlivostní zapojení prvků paralelně

V některých případech, kde se kladou na systém různé požadavky, není nožné využít zapojení podle obr. 2 s trvalým provozem obou prvků. Pak je výhodnější zapojení se zálohováním, přičemž provoz obou prvků se může cyklicky střídat, viz [1].

2.1.3 Aplikace exponenciálního rozložení

Jestliže pro sériové kombinace zapojení aplikujeme exponenciální rozdělení $R(t) = e^{-\lambda \cdot t}$, můžeme určit výslednou spolehlivost systému $R(t)$ a intenzitu $\lambda(t)$. Ze známé spolehlivosti systému se dá určit doba do poruchy t_p (nebo doba mezi poruchami), která je převrácenou hodnotou výsledné intenzity poruch [5].

$$R(t) = \prod_{i=1}^n e^{-\lambda_i \cdot t} = e^{-\sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot t} \quad (2.1.3.1)$$

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (2.1.3.2)$$

$$t_p = \int_0^{\infty} R(t) \cdot dt = \int_0^{\infty} e^{-\sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot t} dt = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \quad (2.1.3.3)$$

U paralelní kombinace je řešení složitější, protože i když mají jednotlivé prvky exponenciální rozdělení doby do poruchy, výsledná spolehlivost doby do poruchy už není exponenciálního rozdělení a také výsledná intenzita není konstantní. Následující vztahy platí systém složený ze dvou prvků (pro n prvků viz [1])

$$R(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - e^{-\lambda_i \cdot t}) \quad (2.1.3.4)$$

$$\begin{aligned} t_p &= \int_0^{\infty} R(t) \cdot dt = \int_0^{\infty} [1 - (1 - R_1(t)) \cdot (1 - R_2(t))] \cdot dt = \int_0^{\infty} [R_1(t) + R_2(t) - R_1(t) \cdot R_2(t)] \cdot dt = \\ &= \int_0^{\infty} e^{-\lambda_1 \cdot t} + e^{-\lambda_2 \cdot t} + e^{-(\lambda_1 + \lambda_2) \cdot t} \cdot dt = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2} \end{aligned} \quad (2.1.3.5)$$

U paralelního řazení je také nutné si uvědomit, že výpadek některých prvků systému nemusí znamenat provozuschopný stav. U prvků, které přebírají funkci těch v poruše, mohou být přetíženy a z hlediska spolehlivosti to znamená poruchový stav. Pro výslednou pravděpodobnost poruchy pak platí vztah [5]:

$$Q = Q_S^{N-M+1} \quad (2.1.3.5)$$

kde:

Q_s	je střední pravděpodobnost poruchy prvků,
N	je celkový počet paralelních prvků,
M	minimální počet prvků zajišťující normální provoz,
$(M-N)$	počet záložních prvků,
$(M-N+1)$	při poruše těchto prvků dojde k poruše celého systému.

Zvyšováním N prvků dochází ke zvyšování spolehlivosti, ale také ke zvyšování investic, složitosti zařízení atd. V praxi se často používá zjednodušené řešení pro paralelní zapojení prvků.

Střední doba mezi poruchami:

$$m_s = \frac{8760}{\lambda} \quad [\text{h; rok}^{-1}] \quad (2.1.3.6)$$

Střední doba trvání poruchy:

$$\tau = \frac{8760}{\mu} \quad [\text{h}^{-1}]$$

Činitel prostoje (porucha, údržba nebo revize)

$$k_v = \frac{\tau}{m_s + \tau} = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \quad (2.1.3.7)$$

Činitel pohotovosti:

$$k_p = \frac{m_s}{m_s + \tau} = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \quad (2.1.3.8)$$

kde:

λ	je intenzita poruch (rok^{-1}),
τ	je střední doba trvání poruchy (h^{-1}),
μ	intenzita oprav (rok^{-1}).

Vztah pro činitel prostoje lze upravit:

$$k_v = \frac{\tau}{\frac{8760}{\lambda} + \tau} = \frac{\lambda \cdot \tau}{8760 + \lambda \cdot \tau} \quad (2.1.3.9)$$

Jestliže bude $\lambda \ll 8760$ (bývá většinou splněno) pak:

$$k_v = \frac{\lambda \cdot \tau}{8760} \quad (2.1.3.10)$$

Následující úvaha matematicky popisuje podmínky vzniku poruchy systému paralelního zapojení dvou prvků. Porucha systému může nastat při poruše prvku 1, když prvek 2 bude ve vynuceném prostoji nebo obráceně [5].

$$\lambda_v = \lambda_1 \cdot k_{v2} + \lambda_2 \cdot k_{v1} \quad (2.1.3.11)$$

A po úpravě dostaneme:

$$\lambda_v = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{8760} (\tau_1 + \tau_2) \quad (2.1.3.12)$$

Ze zjednodušeného vztahu je patrné, že výsledná intenzita není závislá pouze na intenzitě obou prvků, ale také na době prostoje, který může vzniknout poruchou, revizí nebo údržbou [5].

2.2 Metodika výpočtu spolehlivosti dle směrnice Čez 22/80

Tato metodika je aplikací základní metodiky spolehlivostních schémat, která je důsledně aplikovaná na energetické systémy [5].

Výhody oproti klasické metodě spolehlivostních schémat:

- Uvažuje s údržbovými prostoji
- Umožňuje výpočet s manipulací, tzv studené rezervy

Nevýhody této metody:

- Nezahrnuje koordinaci údržby

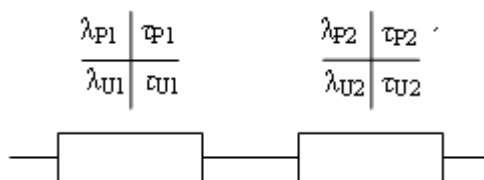
Zjednodušení a předpoklady

- Počasí nemá vliv na intenzitu poruch a oprav
- Uvažuje se exponenciální rozdělení distribuční funkce dob poruch a oprav všech prvků elektrické sítě
- Vychází se z průměrných údajů

Základem této metody je řešení dílčích spolehlivostních zapojení dvou prvků. Uvažují se tři možnosti zapojení (viz dále) a jejich kombinacemi je možno řešit prakticky všechny druhy sítí. [1][5]

2.2.1 Sériové zapojení

Sériové zapojení je takové, u kterého porucha jednoho elementu způsobí poruchu celého systému.



Obr. 2.3. Sériové zapojení

Pro intenzitu poruch λ_p a intenzitu údržby λ_U platí vztahy:

$$\lambda_p = \lambda_{p1} + \lambda_{p2} \quad (1/\text{rok}) \quad (2.2.1.1)$$

$$\lambda_U = \lambda_{U1} + \lambda_{U2} \quad (1/\text{rok}) \quad (2.2.1.2)$$

$$\lambda = \lambda_p + \lambda_U \quad (1/\text{rok}) \quad (2.2.1.3)$$

Střední doby prostojů:

$$\tau_p = \frac{(\lambda_{p1} \cdot \tau_{p1} + \lambda_{p2} \cdot \tau_{p2})}{\lambda_p} \quad (\text{hod}) \quad (2.2.1.4)$$

$$\tau_U = \frac{(\lambda_{U1} \cdot \tau_{U1} + \lambda_{U2} \cdot \tau_{U2})}{\lambda_U} \quad (\text{hod}) \quad (2.2.1.5)$$

Pro pravděpodobnost bezporuchového chodu platí vztah:

$$R = R_1 \cdot R_2 \quad (2.2.1.6)$$

Tedy:

$$R = 1 - \frac{\lambda_p \cdot \tau_p + \lambda_U \cdot \tau_U}{8760} \quad (2.2.1.7)$$

Vztahy nerespektují tzv. koordinaci údržby, jelikož má-li se provádět údržba spolehlivostních sériových prvků, provede se ve stejné době. Pak tedy výsledná intenzita údržby je maximem hodnoty obou prvků, a nikoliv jejich součtem.[5]

2.2.2 Paralelní zapojení (horká rezerva)

V případě poruchy jednoho prvku, přebírá jeho funkce prvek druhý. Při tomto zapojení se neuvažuje údržbový prostoj, jelikož při poruše jednoho prvku nebude zahájena údržba druhého prvku.

$$\lambda_{PP} = \frac{1}{8760} [\lambda_{U1} \cdot \lambda_{P2} \cdot \tau_{U1} + \lambda_{U2} \cdot \lambda_{P1} \cdot \tau_{U2} + \lambda_{P1} \cdot \lambda_{P2} \cdot (\tau_{P1} + \tau_{P2})] \quad (2.2.2.1)$$

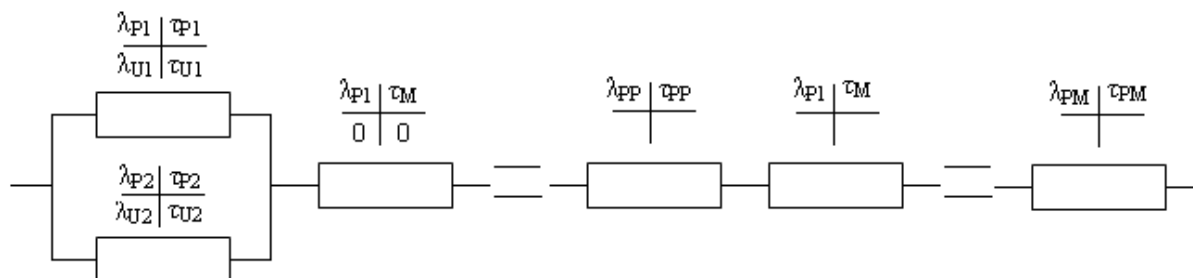
$$\tau_{PP} = \frac{1}{8760 \cdot \lambda_{PP}} \left[\lambda_{U1} \cdot \lambda_{P2} \cdot \tau_{U1} \cdot \frac{\tau_{U1} \cdot \tau_{P2}}{\tau_{U1} + \tau_{P2}} + \lambda_{U2} \cdot \lambda_{P1} \cdot \tau_{U2} \cdot \frac{\tau_{U2} \cdot \tau_{P1}}{\tau_{U2} + \tau_{P1}} + \lambda_{P1} \cdot \lambda_{P2} \cdot \tau_{P1} \cdot \tau_{P2} \right] \quad (2.2.2.2)$$

Pravděpodobnost bezporuchového provozu:

$$R = (1 - R_1) \cdot (1 - R_2) \quad (2.2.2.3)$$

2.2.3 Paralelní zapojení (studená rezerva)

Při tomto zapojení musí být do výpočtu zahrnut manipulační čas. Předpokladem je, že jestliže nastane porucha na prvku 1, uvede se po manipulaci do provozu prvek 2 a toto zapojení opět plní svou funkci. Při tom se počítá s absolutně spolehlivým přepínačem.



Obr. 2.4. Sérioparalelní zapojení

Pro zapojení se studenou rezervou platí výsledný vztah:

$$\lambda_{PM} = \lambda_{PP} + \lambda_{P1} \quad (2.2.3.1)$$

$$\tau_{PM} = \frac{1}{\lambda_{PM}} (\lambda_{PP} \cdot \tau_{PP} + \lambda_{P1} \cdot \tau_M) \quad (2.2.3.2)$$

kde:

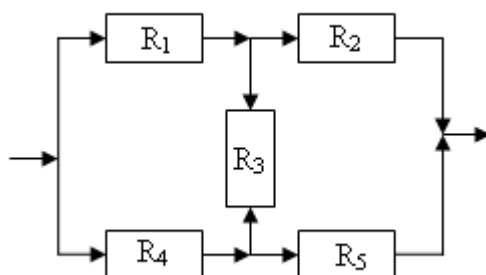
τ_M je manipulační čas.

Pravděpodobnost bezporuchového stavu:

$$R = 1 - \frac{\lambda_p \cdot \tau_p + \lambda_U \cdot \tau_U}{8760} \quad (2.2.3.3)$$

2.3 Metody řešení pro složité systémy

V některých případech nelze přenést systém na kombinace sériových a paralelních zapojení prvků, jako např. spolehlivostní schéma v můstkovém zapojení. Při zpracování takového systému se pak musí využít obecnějších postupů. Metod pro řešení je celá řada, např. pro systémy s malým počtem prvků lze využít metodu rozkladu, metodu minimálních řezů a metodu drah. Další jsou metoda stromu poruch, metoda incidenčních matic nebo metoda seznamu. Pro systémy pracující s diskrétními stavy ve spojitém čase je vhodné využít Markovovy procesy. K řešení složitých a rozsáhlých aglomerací je výhodné použití simulačních metod.



Obr. 2.5 Schéma můstkového zapojení

2.4 Globální ukazatele spolehlivosti

K číselnému vyjádření spolehlivosti dodávky elektrické energie se používají tzv. globální ukazatele spolehlivosti dodávky elektrické energie. [1]

Definujeme tyto ukazatele:

- a) Četnost výpadků (počet výpadků/rok/odběratele)
- b) Celková doba trvání všech výpadků (min/rok/odběratele)
- c) Doba trvání jednoho výpadku (min/výpadek)

Tyto ukazatele doporučené pro tento účel UNIPED, které v ČR vypracovala odborná skupina „Spolehlivost“ a později převzaté (s menšími úpravami) do PPDS (pravidla provozování distribučních soustav) charakterizují střední průměrnou spolehlivost dodávky a jejich důsledky z pohledu odběratele. Jsou vyžívány především ve vztahu k poradenským firmám, regulačnímu orgánu i vzájemnému porovnání v REAS.[1]

Vyhodnocovány jsou pouze děje trvající déle jak 3 minuty podle EN 50160. Kratší průběhy spadají do oblasti EMC (elektromagnetické kontability). V praktické části jsou brány v úvahu výskyty poruchy delší jak 1min.

Pro určení globálních ukazatelů je třeba danou událost popsanou následujícími údaji, jejichž význam bude znát z variant uvedených níže.

T_0 datum a čas začátku události

T_1 datum a čas začátku manipulací

Pozn. U plánovaných událostí je datum a čas začátku události a manipulace stejný

T_2 datum a čas konce manipulací pro vymezení poruchy

T_3 datum a čas obnovení dodávky v ovlivněném úseku

T_4 datum a čas konce události, tj. čas obnovení schopnosti zařízení plnit svou funkci

Pozn. U plánovaných událostí je datum a čas konce události a manipulace stejný

T_Z datum a čas zemního spojení

P_1 výkon v čase T_0 v kVA, uvažuje se nedodaný výkon v čase od T_0 až T_1

P_2 výkon v čase T_2 v kVA, pro nedodaný výkon se uvažuje čas od T_2 až T_3 , v čase T_1 až T_2 se uvažuje střední hodnota z P_1 a P_2 .

[5]

Dopad události se nemusí znázorňovat jen pomocí nedodaných výkonu, ale lze vycházet z variant počtu postižených distribučních transformátorů (odpojených), popřípadě počtu zákazníků postižených výpadkem (bez napětí) nebo z počtu omezených uzlů.

D_1 – počet distribučních stanic bez napětí v čase T_0

D_2 – počet distribučních stanic bez napětí v čase T_2

Z_1 – počet zákazníků bez napětí v čase T_0

Z_2 – počet zákazníků bez napětí v čase T_2

2.4.1 Varianta omezení dodávky odběratelům

Zaznamenává se počet postižených odběratelů a doba trvání výpadků. Je nejpoužívanější metoda. Pro tuto metodu platí vztahy:

Četnost výpadků:

$$\lambda_G = \frac{\sum_j n_j}{N_s} \quad (\text{výpadek/rok}^{-1}) \quad (2.4.1.1)$$

Souhrnná doba trvání všech výpadků (vztaženo na jednoho odběratele)

$$\tau_{Gv} = \frac{\sum_j n_j \cdot t_j}{N_s} \quad (\text{min/rok}^{-1}) \quad (2.4.1.2)$$

Doba trvání jednoho výpadku:

$$\tau_G = \frac{\sum_j n_j \cdot t_j}{\sum_j n_j} \quad (\text{min/výpadek}^{-1}) \quad (2.4.1.3)$$

kde:

- n_j počet odběratelů ve skupině postižených odběratelů j (-),
- t_j střední doba trvání výpadku pro odběratele skupiny j (min),
- N_s celkový počet zásobovaných odběratelů.

Střední doba výpadku t_j je určena vztahem:

$$t_j = \frac{Z_1 \cdot (T_1 - T_0) + (Z_1 + Z_2) \cdot (T_2 - T_1) / 2 + Z_2 \cdot (T_3 - T_2)}{Z_1} \quad (\text{min}) \quad (2.4.1.4)$$

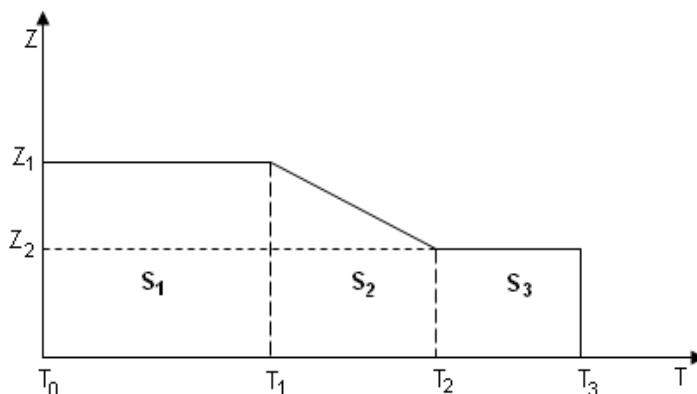
Vztah mezi globálními ukazateli:

$$\tau_G = \frac{\tau_{Gv}}{\lambda_G} \quad (2.4.1.5)$$

Obrázek 6 znázorňuje počet postižených zákazníků v intervalech T_i až T_j a také je zněj zřejmá střední doba trvání poruchy podle vztahu. První část S_1 znázorňuje dobu vzniku poruchy do počátku manipulací. Je postiženo nejvíce odběratelů.

Druhá část S_2 určuje dobu manipulací až do vymezení poruchy. Počet postižených odběratelů se snižuje ze Z_1 na Z_2 (lineárně).

Třetí část S_3 je doba od vymezení poruchy do úplného obnovení dodávky. V této době je postiženo Z_2 odběratelů. Při výpadku se nemusí počet odběratelů bez napětí



Obr. 2.6. Znázornění počtu postižených odběratelů na průběhu poruchy nedojde ke změně počtu postižených odběratelů, je doba výpadku rozdílem časů $T_3 - T_0$. [5]

2.4.2 Varianta omezení instalovaného výkonu a varianta omezení distribučních trafostanic

Ad a) Řešení této varianty je obdobné jako u předchozího případu, s tím rozdílem, že místo počtu postižených odběratelů se bere v úvahu instalovaný výkon u postižených odběratelů. [1]

Četnost výpadků:

$$\lambda_G = \frac{\sum_j l_j}{L_s} \quad (\text{výpadek/rok}^{-1}) \quad (2.4.2.1)$$

Ad b) Rozdílem oproti předchozím variantám je dosažení počtu postižených distribučních trafostanic vn/nn (DTS). [1]

Četnost výpadků:

$$\lambda_G = \frac{\sum_j s_j}{S_s} \quad (\text{výpadek/rok}^{-1}) \quad (2.4.2.2)$$

kde:

- l_j instalovaný výkon ve skupině postižených odběratelů j (kVA),
- L_s celkový instalovaný výkon (kVA),
- s_j počet DTS ve skupině postižených odběratelů j (-),
- S_s celkový počet DTS (-).

2.4.3 Nedodaná energie

Pro množství nedodané energie je třeba znát kromě spolehlivostních ukazatelů také odebíraný výkon v daném uzlu, podle vzorce:

$$W_{NED} = \frac{\lambda \cdot \tau \cdot T_{MAX} \cdot P_{MAX}}{8760} \quad (\text{kWh.rok}^{-1}) \quad (2.4.3.1)$$

Pravděpodobnost bezporuchového chodu lze vyjádřit kromě zákonů o rozdělení (v tomto případě exponenciální z.) také pomocí celkových dob dodávky elektrické energie a výpadku dodávky elektrické energie. [1]

$$R = \frac{T_{DOD}}{T_{DOD} + T_{VYP}} = 1 - \frac{T_{VYP}}{T_{CHOD} + T_{VYP}} \quad (2.4.3.2)$$

kde:

T_{DOD} celková doba dodávky za určité období (h),

T_{VYP} celková doba výpadku za určité období (h),

T_{MAX} doba využití maxima (h.rok^{-1}),

P_{MAX} maximální odebíraný výkon (kW).

2.4.4 Další používané ukazatele

Používá se čtyř základních ukazatelů spolehlivosti dodávky elektrické energie. SAIFI, SAIDI, CAIDI, ASAI.

Průměrná intenzita poruch:

$$SAIFI = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot N_i}{\sum_{i=1}^n N_i} \quad (\text{výpadek.rok}^{-1}) \quad (2.4.4.1)$$

Průměrná doba trvání výpadku:

$$SAIDI = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot \tau_i \cdot N_i}{\sum_{i=1}^n N_i} \quad (\text{min.rok}^{-1}) \quad (2.4.4.2)$$

Průměrná doba trvání výpadku na jednoho odběratele:

$$CAIDI = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot \tau_i \cdot N_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot N_i} \quad (\text{min.výpadek}^{-1}) \quad (2.4.4.3)$$

A také střední ukazatel spolehlivosti vyjadřující pravděpodobnost bezporuchového stavu:

$$ASAI = \frac{\sum_{i=1}^n N_i \cdot 8760 - \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot \tau_i \cdot N_i}{\sum_{i=1}^n N_i \cdot 8760} \quad (2.4.4.4)$$

Ze srovnání klasických a globálních ukazatelů spolehlivosti je patrná vazba mezi nimi. Pro porovnání je možno využít odkazu.[15][16]

2.5 Simulační metoda Monte-Carlo (MC)

Metoda MC je velmi univerzální a flexibilní. Použití této se liší od předchozích analytických metod jelikož je založena na experimentálním modelování a matematice. Oproti analytické metodě, kde je chování prvku popsáno analytickými modely se u MC simuluje skutečné chování systému pomocí vztahů zachycených v tomto modelu.

Základní myšlenkou každého výpočtu metody Monte-Carlo je, že chceme určit střední hodnotu veličiny, která je výsledkem náhodného děje. Vytvoří se model tohoto děje a po proběhnutí dostatečného množství simulací nutných k požadované přesnosti se z dosažených simulací (stavů) vypočítají spolehlivostní ukazatele. Při výpočtu ukazatelů a určování kroků simulace se používají metody matematické statistiky. [4]

Základním problémem při modelování experimentu je určení doby, kdy dochází ke změně stavu prvků. Tuto dobu odvozujeme z inverzní funkce distribučního rozdělení $Q_T(t)$. Pomocí generátoru náhodných čísel obdržíme údaj z intervalu $(0,1)$ a z funkce $Q_T^{-1}(t)$ dostaneme čas změny stavu prvku. Výsledné vztahy pro několik rozložení jsou uvedeny v tabulce. [1]

Tab. 2.1 Výsledné vztahy z generátoru náhodných čísel

Rozložení hustoty pravděpodobnosti výpadků	Hustota výpadků pravděpodobnosti	Vztah pro generování doby nastávání jevu
Exponenciální	$\frac{1}{\beta} \cdot e^{-\frac{t}{\beta}}$	$T = -\beta \cdot \ln(U)$
Weibullovo	$\frac{\beta}{\alpha^\beta} \cdot t^{(\beta-1)} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta}$	$T = -\beta \cdot \ln(U)^{\frac{1}{\beta}}$
Pozn. U je náhodně generované číslo $(0,1)$		

Pomocí metody Monte-Carlo lze modelovat různé druhy provozních obnovitelných dějů, které zahrnují např. i optimalizaci nákladů na provoz elektrizační soustavy.

MC simulace využívá generátor náhodných čísel a z toho důvodu dostáváme i při stejných vstupech rozdílné výsledky, takže aby nedošlo k rozdílným výsledkům, musí být provedeno co nejvíce simulací, které mohou být statisticky dále zpracovány. Počet simulací lze založit na střední hodnotě všech výsledků. Jestliže střední hodnota konverguje k ustálené hodnotě, je počet simulací uspokojivý. [1]

Matematicky vztah pro střední hledanou hodnotu:

$$\bar{x} = \lim_{N \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \right) \quad (2.5.1)$$

kde:

\bar{x} střední hodnota,
 x_i výsledek i-té simulace,
 N počet simulací.

Rozlišujeme dvě základní simulace pro metodu MC, nesequenční (náhodná) a sekvenční. Pro nesequenční simulaci je každý vzorek stavu systému zvolen náhodně podle svého rozdělení nezávisle na předchozím stavu systému. U sekvenční simulace je tomu naopak, jelikož ta vztah k minulosti zachovává a vždy je náhodně volena pouze změna systému (např. hydrosystémy, kde způsob modelování je závislý na předcházejícím stavu). [1]

Použití sekvenční simulace: Tato simulace modeluje chování systému přesně ve stejném sledu událostí, v jakém nastávají ve skutečnosti, tj. sled náhodných událostí navazujících jedna na druhou tak, jak se vyvíjí s časem. Události mohou vzniknout ve kterémkoliv okamžiku, a jiné mohou být podmíněné výskytem předcházejících událostí. Interval je rozdělen do menších časových řezů

Použití nesequenční simulace: Jestliže jsou náhodné události vzájemně nezávislé, tak chování systému nezávisí na předcházejícím pořadí a simulace mohou probíhat v náhodném pořadí. Tato simulace je výpočetně méně náročná a její uplatnění je především při výpočtech elektrických sítí.

Generované náhodné číslo je mezi 0 a 1 určuje, kolikrát nastane porucha v měřeném roce. Číslo bude v tomto rozmezí, jestliže bude splňovat podmínky podle následující tabulky.

$x < e^{-\lambda}$	Během simulovaného období nedojde k výskytu poruchy
$e^{-\lambda} < x < \lambda \cdot e^{-\lambda}$	Nastane jedna porucha
$\lambda \cdot e^{-\lambda} < x$	Nastane více poruch

Použití exponenciálního rozložení je vhodné pro řešení spolehlivosti elektroenergetických systémů. Je jednodušší a umožňuje kombinovat simulační metody s analytickými metodami.

Pravděpodobnost, že interval mezi dvěma po sobě jdoucími výpadky nabude hodnoty ΔT je:

$$P(\Delta T) = \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot \Delta T} \quad (2.5.2)$$

Pro generování náhodných veličin a čísel podle exponenciálního rozdělení je výhodné použít metodu inverzní transformace podle vztahu:

$$x = Q^{-1}(r) \quad (2.5.3)$$

Kde $r \in \langle 0,1 \rangle$ je náhodné číslo a Q je distribuční funkce požadovaného rozložení.

Následně dosazením za F exponenciálního zákona:

$$r = 1 - e^{-\lambda \cdot x} \quad (2.5.4)$$

A konečný vztah pro generování je tedy:

$$x = -\frac{1}{\lambda} \cdot \ln(1 - r) \quad (2.5.5)$$

Ke generování náhodných čísel lze použít algoritmu, a s jeho pomocí získávat tzv. pseudonáhodná čísla, u kterých platí, že se s určitou periodou opakují [1].

2.5.1 Výhody simulační metody

- Uvažované systému nemusí mít reálnou podobu
- Použití pro složitý a rozsáhlý systém
- Možnost modelování systému v mnohaletém používání
- Možnost modelovat odbočky typu T
- Procenění výkonové bilance a určení přetížených prvků

2.5.2 Nevýhody MC

- Přesnost závisí na počtu iterací
- výstavba užitečného simulačního programu je náročná, většinou je potřeba vytvořit několik variant modelu

3 Testovací sítě pro výpočet spolehlivosti elektroenergetických sítí

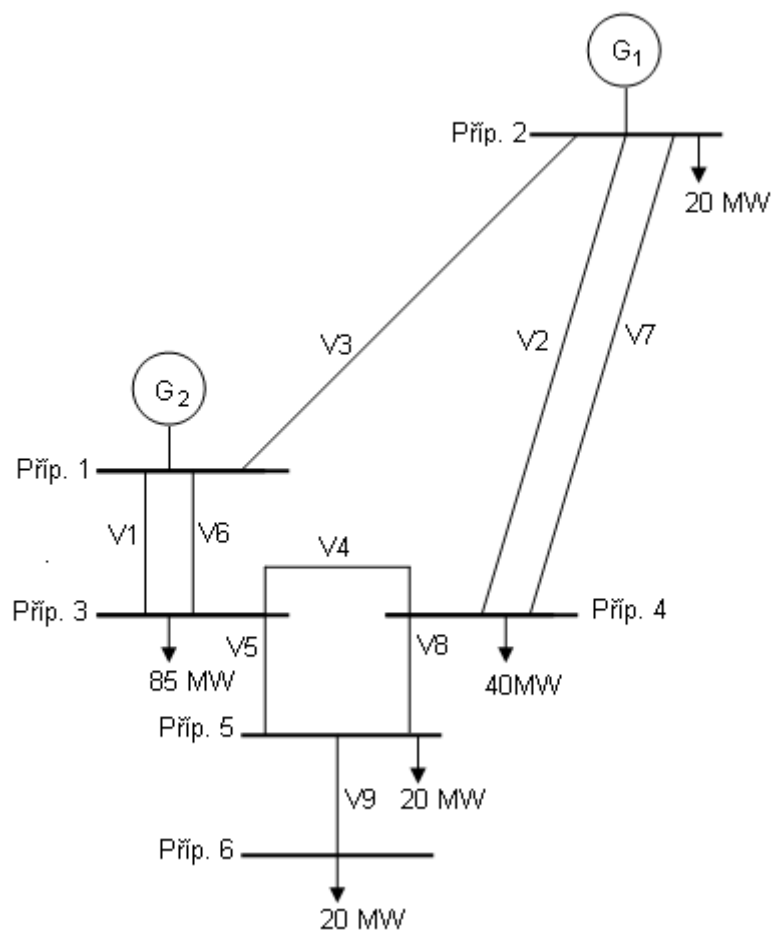
Důležitý příspěvek spolehlivostních testovacích sítí (RTS - Reliability Test System) je poskytování východiska s cílem shromáždění údajů a vývoje metodik k provedení spolehlivostní studie. Celkové údaje a metodika vývoje je proces iterace (opakování) a s ním přichází zvýšené pochopení významu spolehlivosti v návrhu a provozu elektrizační soustavy. Studie těchto sítí umožňují porovnání dosažených výsledků, schopnosti (či neschopnosti) programů použitých technik řešení ve spolehlivosti.

3.1 Testovací síť RBTS

Hlavním cílem testovacího systému pro studijní účely je, aby nebyl řešený systém dostatečně malý (ani velký a složitý), ale dostatečně podrobný, a odrážel složitosti a vazby spojené s praktickou analýzou spolehlivosti. Systém by měl být snadno řešitelný pomocí ručních výpočtů, předtím než je výpočet přenesen na počítače. Řešený systém bude uváděn pod zkratkou RBTS (Roy Billinton Test System) jenž prezentoval kolektiv výkonové energetiky univerzity v Saskatchewan, pod vedením prof. Roye Billintona v Kanadě. [6]

3.1.1 Popis RBTS

Systém tvoří jedenáct výrobních jednotek připojených ke dvěma generátorovým přípojnícím (PV), čtyři odběrové přípojnice (PQ) a devět přenosových vedení. Minimálním a maximálním výkonům generátorů přísluší hodnoty 5 a 40 MW. Nejvyšší zatížení je 185 MW a celkový instalovaný výkon všech generátorů je 240 MW. Přenos vedení se skládá z jednotlivých vedení a souběžných vedení. Síť je koncipována tak, aby délky vedení odpovídaly poměru k jejich skutečné délce, a lze ji použít, aby zvážila různé části systému z hlediska připojení zákazníků k těmto regionům podle jejich třídy (důležitosti odběru).



Obr. 3.1. Schéma systému RBTS

Tab. 3.1. Rozdělení PQ přípojnic RBTS

Odběr		
Odběroví přípojnice	Výkon	Typ odběru (odběratele, zákazníka)
2 *	20MW	Maloodběry Instituce
3	85MW	Velkoodběry Maloodběry Úřední a kancelářské budovy
4	40MW	Maloodběry
5	20MW	Instituce Kanceláře
6	20MW	Maloodběry Hospodářství
Pozn. a) * slouží i jako generátorová přípojnice b) maloodběr se uvažuje do 5 MW c) velkoodběr nad 5 MW		

3.1.2 Výrobní systém

Hodnoty výrobních jednotek a spolehlivost pro RBTS uvádí v tabulce 3.2. Výrobní náklady těchto jednotek jsou pro zajímavost dodány v příloze E.

Tab. 3.2. Údaje spolehlivosti pro výrobní jednotky

Jednotka	typ	Počet jednotek	Pravděpodobnost poruchy	Střední doba mezi poruchami	Intenzita poruch	Střední doba opravy	Intenzita oprav	Plánovaná údržba
Unit size	Type	No. of units	Forced outage rate	MTTF	Failure rate per year	MTTR	Repair rate per year	Scheduled maintenance
[MW]	-	-	-	[hod]	[za rok]	(h)	[za rok]	[Týden/rok]
5	Vodní	2	0,010	4380	2,0	45	198,0	2
10	Tepelná	1	0,020	2190	4,0	45	196,0	2
20	Vodní	4	0,015	3650	2,4	55	157,0	2
20	Tepelná	1	0,025	1792	5,0	45	195,0	2
40	Vodní	1	0,020	2920	3,0	60	147,0	2
40	Tepelná	2	0,030	1460	6,0	45	194,0	2

3.1.3 Dodatečné výrobní jednotky

Jako dodatečné jednotky RBTS mohou být použity plynové turbíny, aby pokryly kritérium rizik, jako je předpoklad ztráty zatížení (LOLE) nebo předpoklad hodnoty ztráty energie (LOEE) pod podmínkou růstu zatížení, zvýšení výrobních jednotek (výkonů) v důsledku stárnutí a jejich zvýšené poruchovosti (FOR) atd. Výkony, výpadky a údaje o nákladech týkající se těchto plynových turbín jsou uvedeny v tabulce 3.3.

Tab. 3.3. Údaje spolehlivosti pro dodatečné plynové turbíny

Variabilní data			
Výkon	FOR	MTTF	MTTR
[MW]		(hod)	(hod)
10	0,12	550	75

3.1.4 Přenosový systém

Hodnota přenosového napětí je 230kV. Rozmístění výrobních do dvou přípojníc jednotek znázorňuje tabulka 3.4. Pro přenos elektrické energie bylo použito mezi některými uzly dvojitého vedení viz tab. 3.7.

Tab. 3.4 Rozmístění výrobních jednotek

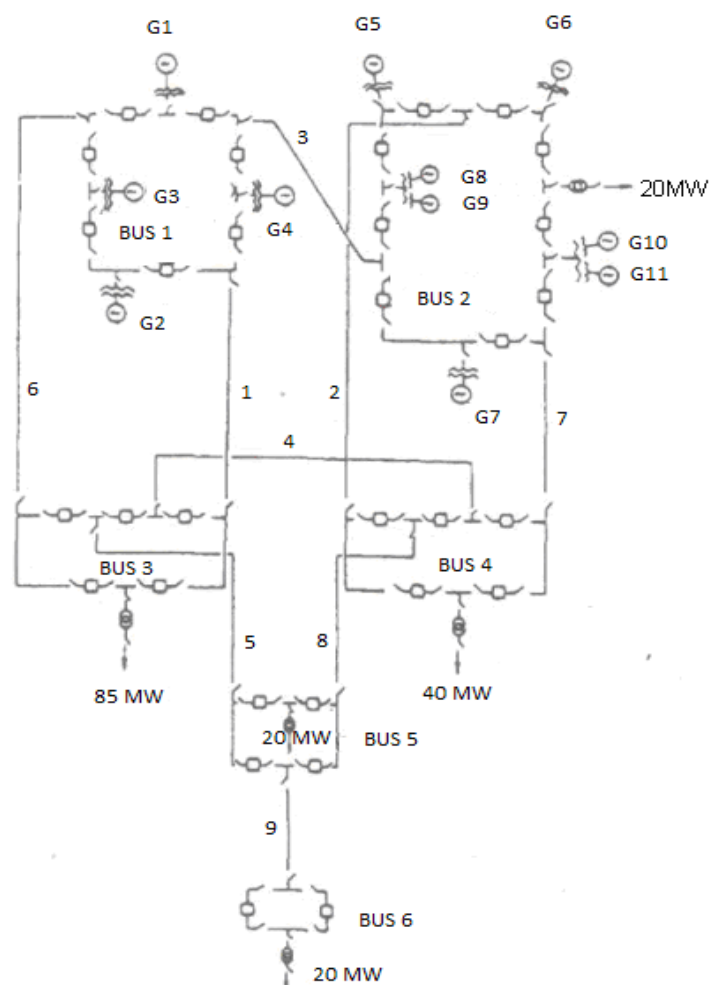
Číslo jednotky	přípojnice	Výkon (MW)	Typ jednotky
1	1	40	Tepelná
2	1	40	Tepelná
3	1	10	Tepelná
4	1	20	Tepelná
5	2	5	Vodní
6	2	5	Vodní
7	2	40	Vodní
8	2	20	Vodní
9	2	20	Vodní
10	2	20	Vodní
11	2	20	Vodní

Předpokládá se, že účinník každé přípojnice je jedna. Pro praktické řešení by mělo být využito hodnoty 0,98 až 0,95. Této hodnotě účinníku 0,98 odpovídá reaktivní zatížení jalovým výkonem (Mvar) na každé přípojnici 20% činného výkonu. Tabulka 3.5 porovnává základní spolehlivostní údaje přenosového vedení. Permanentní (stálá) četnost výpadku daného přenosového vedení je získaná použitím hodnoty 0,02 výpadků ročně na kilometr. Přechodné vynucené četnosti výpadků jsou vypočtené použitím hodnoty 0,05 výpadků ročně na kilometr. Trvání přechodného výpadku se předpokládá být menší než jedna minuta, a proto tedy není podrobněji zahrnutý v tabulce. Výpadky rozvodných komponentů, které nejsou spínané stejně jako část vedení, také nejsou zahrnuté v datech daného výpadku. Hodnoty impedance a proudové zatížení vedení přepisuje tabulka 3.6.[9]

Tab. 3.5 Délky přenosového vedení a délky výpadků

Vedení	Přípojnice		Délka km	Permanentní četnost výpadků	Trvání výpadku	Přechodná rychlost výpadku
	Od	Do		Za rok	(hod)	Za rok
1	1	3	75	1,5	10,0	3,75
2	2	4	250	5,0	10,0	12,50
3	1	2	200	4,0	10,0	10,00
4	3	4	50	1,0	10,0	2,50
5	3	5	50	1,0	10,0	2,50
6	1	3	75	1,5	10,0	3,75
7	2	4	250	5,0	10,0	12,50
8	4	5	50	1,0	10,0	2,50
9	5	6	50	1,0	10,0	2,50

Rozvodná konfigurace pro výrobní a odběrové přípojnice jsou uvedeny v rozšířeném přehledovém schématu znázorněném na obrázku 3.2[6]



Obr. 3.2. Rozšíření přehledového schématu zapojení RBTS

Tab. 3.6 Údaje pro přenosové vedení

Vedení	Přípojnice		Impedance (p.u)		Proudové zatížení (p.u)
	Od	Do	R	X	
1,6	1	3	0,0342	0,180	0,85
2,7	2	4	0,1140	0,600	0,71
3	1	2	0,0912	0,480	0,71
4	3	4	0,0228	0,120	0,71
5	3	5	0,0228	0,120	0,71
8	4	5	0,0228	0,120	0,71
9	5	6	0,0228	0,120	0,71
p.u. vztaženo na 100 MVA a 230 kV					

Vedení v následující tabulce mají stejnou trasu přenosu a pro jejich společnou dráhu je využito souběhu vedení.

Tab. 3.7 Informace souběžných vedení

Přípojnice		Vedení	Běžná vzdálenost	Četnost výpadků	Trvání výpadku
Bus		Line	Common length	Outage rate	Outage duration
od	do		(km)	Za rok	(hod)
1	3	1	75	0,150	16
1	3	6	75	0,150	16
2	4	2	250	0,500	16
2	4	7	250	0,500	16

Data přístrojů v rozvodnách:

Výkonový vypínač:

Aktivní intenzita poruch	= 0,0066 selhání za rok
Pasivní intenzita poruch	= 0,0005 selhání za rok
Průměrná délka výpadku	= 72 hodin
Údržbová intenzita výpadků	= 0,2 vyřazení ročně
Doba údržby	= 108 hodiny
Doba spínání	= 1 hodina

Sekce přípojnic:

Intenzita poruch	= 0,22 selhání ročně
Délka výpadku	= 10 hodin

Staniční transformátor:

Intenzita poruch	= 0,02 selhání ročně
Délka výpadku	= 768 hod.
Údržbová intenzita výpadků	= 0,2 vyřazení ročně
Doba údržby	= 72 hodiny
Doba spínání	= 1 hod.

3.1.5 Výsledky získané ze zahraniční literatury pomocí metody síťového toku

Tato metoda nastiňuje, že každý prvek v RBTS je určen svou schopností maximálního zatížení určeného na jednotku jmenovitého proudu. Tabulka 3.8 ukazuje roční hodnoty ukazatelů přípojnic pro používání metody přenosového toku, kde výpadek každé jedné přípojnice je výsledkem těchto hodnot. Maximální hodnoty ukazatelů přípojnic jsou v tabulce 3.9.[7]

Tab. 3.8. Roční ukazatele přípojnic

Přípojnice	Pravděpodobnost poruchy	Četnost poruch	Omezená zátěž (MW)	
			Celková	Odpojená
2	0,00834	3,064198	4,66	0
3	0,00838	3,072886	19,55	0
4	0,00838	3,072901	9,2	0
5	0,00838	3,073140	4,65	0
6	0,00952	4,085422	27,34	22,51
Přípojnice	Odříznutá energie (MWh)		Trvání omezení zatížení (hod)	
	Celkem	Odpojená	Celkem	Odpojená
2	89,00	0	73,03	0,00
3	371,48	0	73,44	0,00
4	174,82	0	73,44	0
5	87,61	0	73,44	0
6	289,01	199,24	83,39	9,96

Tab. 3.9. Maximální hodnoty z přípojnic při použití metody síťového toku

Příp.	Maximální hodnoty	Pravděpod.	Četnost nepředpokládaných dějů	Popis komponentu (ve výpadku)
Max. omezený výkon (MW)				
2	9,19	0,0000002	0,0001743	Generátor1, 2, 7 a 8- výpadek
3	48,38	0	0,0000355	Vedení 1, 2 a 6 – výpadek
4	22,77	0	0,0000355	Vedení 1,2 a 6 – výpadek
5	20	0	0,0000643	Gen 1, vedení 5 a 8 – out
6	20	0,0009047	0,8456631	vedení 9 – výpadek
Maximální omezení energie (MWh)				
2	110,03	0,0000002	0,0001743	Gen 1, 2, 7 a 11 – výpadek
3	467,63	0,0000002	0,0001743	Gen 1, 2, 7 a 8 – výpadek
4	220,06	0,0000002	0,0001743	Gen 1, 2, 7 a 11 – výpadek
5	110,03	0,0000002	0,0001743	Gen 1, 2, 7 a 11 – výpadek
6	187,42	0,0009047	0,8456631	vedení 9 – výpadek

Pokrač. tabulky 3.9.				
Maximální doba s omezeným výkonem (hod)				
2	24,4	0,0002448	0,0878699	Gen 7 a 8 výpadek
3	24,4	0,0002448	0,0878699	Gen 7 a 8 výpadek
4	24,4	0,0002448	0,0878699	Gen 7 a 8 výpadek
5	24,4	0,0002448	0,0878699	Gen 7 a 8 výpadek
6	24,4	0,0002448	0,0878699	Gen 7 a 8 výpadek

Tato kapitola představuje naučný testovací systém, který zahrnuje základní data potřebná k studii spolehlivosti HLI (hierarchická úroveň jedna pro výrobu) a HLII (úroveň výroby a přenosu elektrické energie). Systém poskytuje kostru pro provádění základních výpočtů, které mohou být převážně prováděny ruční kalkulací či jednoduchými počítačovými programy. V tabulce I přílohy B jsou vedeny výsledky použitím zahraničních ukazatelů. Tento systém poskytuje i data vyhodnocení viz [7].

3.2 Testovací síť RTS-79

3.2.1 Popis systému

Výrobní systém obsahuje 32 jednotek v rozsahu od 12 do 400 MW. Přenosový systém obsahuje 24 odběrových a výrobních přípojníc spojených pomocí 38 vedení či transformátorů ve dvou napětích, 138 a 230 kV. Dále zahrnuje kabely, venkovní vedení, vedení souběžná. Přenosové údaje zahrnují délku vedení, impedanci, hodnocení a spolehlivostní data. Roční maximální zatížení pro testovací systém je 2850 MW. Údaje o týdenním vrcholu zatížení v procentech z vrcholu ročního zatížení a denní vrchol z týdenního zatížení je uveden v tabulce I a II přílohy C. [10]

3.2.2 Výrobní systém

Tabulka 3.10 ukazuje seznam výrobních jednotkových výkonů a údajů o spolehlivosti. Navíc jsou uvedeny ukazatele jako poruchovost, a parametry potřebné v kalkulacích doby trvání (MTTF a MTTR). Tabulka poukazuje pouze na data na úplných výpadcích. U výrobní jednotky může nastat také částečné vyřazení. Obojí jak úplné, tak částečné jsou vynucené a naplánované odstávky. Částečné vyřazení mohou mít významný účinek na výrobní spolehlivost, tyto data ale nebyly prezentovány.

Tab. 3.10. Ukazatele pro výrobní jednotky

Velikost jednotky	Číslo jednotky	Poruchovost	Doba mezi poruchami	Doby opravy	Plánovaná údržba
Unit Size	Number of Units	Forced Outage Rate	MTTF	MTTR	Scheduled Maintenance
(MW)			(Hod)	(Hod)	(Týdně/rok)
12	5	0,02	2940	60	2
20	4	0,10	450	50	2
50	6	0,01	1980	20	2
76	4	0,02	1960	40	3
100	3	0,04	1200	50	3
155	4	0,04	960	40	4
197	3	0,05	950	50	4
350	1	0,08	1150	100	5
400	2	0,12	1100	150	6

Pozn. MTTF = střední doba bezporuchového provozu
 MTTR = střední doba oprav
 Poruchovost= MTTR/ (MTTF+MTTR)

3.2.3 Přenosový systém

Přenosová vedení jsou dvou napětí, 138 kV a 230 kV se spojovacími stanicemi 230/138 kV mezi přípojnici 9 a 11, 10 a 12, 3 a 24. Údaje přenosové sítě a propojení definuje obr 1. Rozmístění výrobních jednotek znázorňuje tabulka 3.11. Z této tabulky můžeme postřehnout, že 10 z 24 přípojníc jsou elektrárny. Tabulka 3.12 udává produkci jalového výkonu výrobních jednotek pro kalkulace toku výkonu.

Tab. 3.11. Rozčlenění jednotek do přípojníc

Přípojnice	Jednotka 1	Jednotka 2	Jednotka 3	Jednotka 4	Jednotka 5	Jednotka 6
	(MW)					
1	20	20	76	76		
2	20	20	76	76		
7	100	100	100			
13	197	197	197			
15	12	12	12	12	12	155
16	155					
18	400					
21	400					
22	50	50	50	50	50	50
23	155	155	350			

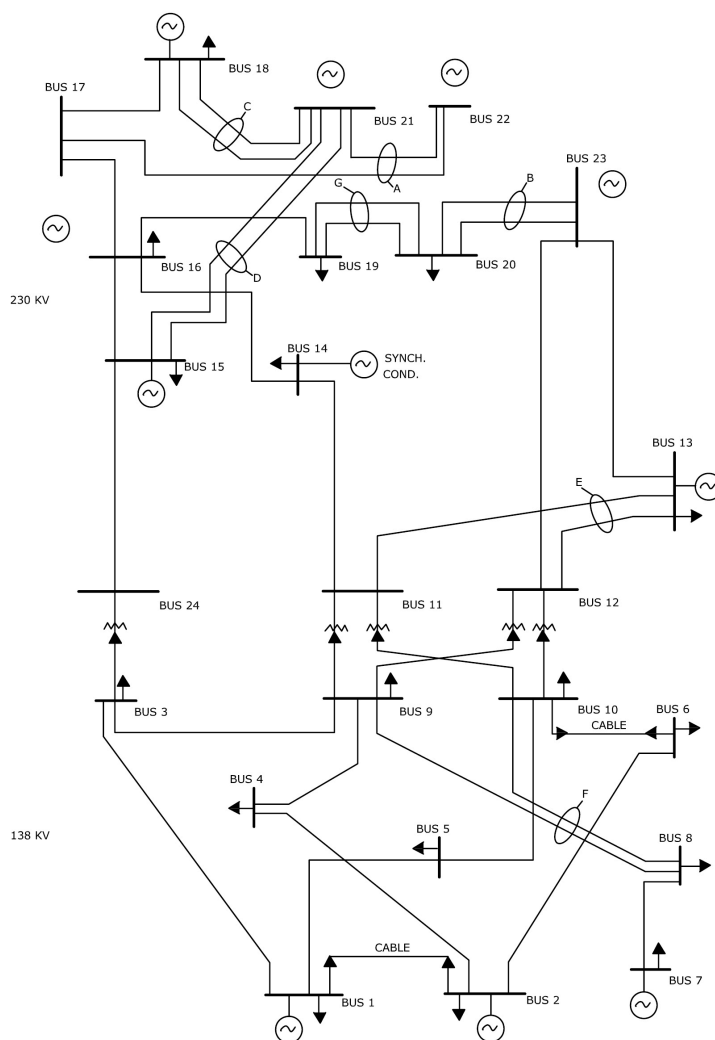


FIGURE 1 - IEEE RELIABILITY TEST SYSTEMS

Obr. 3.3. IEEE RTS 79

Tab. 3.12. Jalový výkon generátorů

Jednotka	(Mvar)	
	min	max
12	0	6
20	0	10
50	-10	16
76	-25	30
100	0	60
155	-50	80
197	0	80
350	-25	150
400	-50	200

Systém má zařízení k udržování elektrického napětí na přípojnicích 14 (synchronní kompenzátor) a přípojnicích 6 (tlumivka). Tabulka 3.13 ukazuje jalovou schopnost těchto zařízení. Tyto zařízení zvýší schopnost testovacího systému udržovat jmenovité napětí, zvláště při provozu s odlišnými podmínkami.

Tab. 3.13. Korekční zařízení napětí

Zařízení	Přípojnice	Jalový výkon [Mvar]
Synchronní kondenzátor	14	50 – jalový
		200 – kapacit.
Reaktor	6	100 – jalový

Pro přenášený výkon je předpokládán účinník 98%. Toto odpovídá požadavku jalovému výkonu přibližně 20% činného výkonu (MW) na každé přípojnicích. Účinník 98% předpokládáme ve všech úrovních zatížení. Tato omezení zatížení přípojnic (žádné nejistoty, žádné různosti, stálý účinník) jsou obvykle předpokladem v hodnoceních spolehlivosti. Data zatížení přípojnic v době vrcholu systému jsou znázorněna v tabulce III přílohy C. Nejsou zde poskytnuta žádná data nejistoty zatížení nebo různorodost zatížení mezi přípojnicemi.[10]

Poruchové odstávky přenosového vedení ukazuje tabulka IV přílohy C. Permanentní výpadky jsou ty, které vyžadují opravu komponenty za účelem znovu uvedení do provozu (údržba a opravy). V literatuře [9] jsou pro stálé výpadky dána četnost a trvání výpadků. Přechodné výpadky jsou ty, které nejsou stálé. Ty zahrnují automatické a ruční opětovné zapínání. Pro přechodné poruchové odstávky je dána pouze četnost výpadků, jelikož doby trvání výpadku jsou velmi krátké [9]. V konkrétním použití, vynucená četnost výpadků přenosového vedení (zvláště pro přechodná vyřazení) jsou závislé na zeměpisném umístění stejně jako jiné faktory. Data v tabulce jsou získány ze zkušenostní a zaznamenávání hodnot výzkumných pracovníků ve Spojených státech a Kanadě.

Permanentní výpadek v této tabulce byl vypočítaný:

$$138\text{kV vedení} : \lambda_p = 0,52L + 0,22 \quad (3.2.3.1)$$

$$230\text{kV vedení} : \lambda_p = 0,34L + 0,29 \quad (3.2.3.2)$$

$$138\text{kV kabelové} : \lambda_p = 0,62L + 0,226 \quad (3.2.3.3)$$

Kde L je délka linky či kabelu na 100 mil (160,9 km). Konstanta v každé rovnosti odpovídá za chyby na koncovém zařízení spínaném s linkou (včetně sekcí přípojníc, ale vyjma obvodu výkonového vypínače).[10]

Data permanentního trvání výpadku v tabulce IV přílohy C je kombinací dat stálé doby výpadku pro vedení (či kabely) a koncového zařízení (odpojovače). Oddělené doby trvání výpadku jsou následující:

Tab. 3.14. Doby výpadků

Příslušný aparát	Permanentní doba výpadku (hod)	
	Vedení/kabelové	Terminal
138 kV vedení	9	11
233 kV vedení	18	8
138 kV kabel	96	9

Hodnoty trvání výpadku byly získané použitím následující rovnosti:

$$R = (\lambda_1 \cdot R_1 + \lambda_2 \cdot R_2) / (\lambda_1 + \lambda_2) \quad (3.2.3.4)$$

kde:

λ_1, R_1 = vedení/kabel četnost výpadku a trvání výpadku,

λ_2, R_2 = terminálová četnost výpadku a trvání výpadku.

Trvání doby výpadku transformátoru v tabulce IV přílohy C je 768 hodiny, což odpovídá 32 dnům. V konkrétní situaci trvání výpadku transformátoru velmi ovlivňuje, zda se využije náhradního transformátoru (zda je k dispozici).

Spíše než výpočet různého času opravy pro jednotlivé vedení se používá průměrná délka vedení v testovacím systému pro každé ze dvou napětí pro výpočet jedné (průměrné) hodnoty λ . Z toho je vypočtena průměrná doba výpadku pro každý napěťový stupeň. Pro dva kabely, se vypočítaly oddělené časy opravy použitím skutečné délky kabelu.[10]

Přechodnou četnost výpadku v tabulce lze vypočítat tímto způsobem:

$$138kV \text{ vedení} : \lambda_i = 5,28 L \quad (3.2.3.5)$$

$$230kV \text{ vedení} : \lambda_i = 2,46 L \quad (3.2.3.6)$$

Předpoklad přechodových vyřazení je, že se vyskytují jen na přenosových vedeních (venkovních). Z toho důvodu, není obsažený žádný stálý termín pro terminálové výpadky, a také přechodná četnost výpadků pro transformátory a kabely je nula[10].

Výpadky rozvodných komponentů, které nejsou spínané jako část linky, nejsou zahrnuté v datech výpadku tabulky IV přílohy C. Pro sekce přípojníc jsou poskytnuté následující data:

Tab. 3.15. Sekce přípojníc

	138 kV	230kV
Poruchy na sekci přípojníc – za rok	0,027	0,021
Procent z permanentních poruch	42	43
Trvání výpadku pro permanentní poruchy – v hodinách	19	13

Tab. 3.16. Statistiky poskytnuté pro elektrické vypínače

Fyzikální porucha/ za rok	0,0066
Provozní porucha vypínače/ za rok	0,0031
Trvání výpadku (hodin)	72

Fyzické selhání je povinné neplánované odstranění ze služby pro opravu či nahrazení. Provozní selhání je selhání uvnitř vypínače běžného ochranného pásma.[10]

Žádné údaje o plánovaných odstávkách přenosového zařízení není uveden. To však neznamená, že plánované výpadky jsou pocítované se zanedbatelným účinek na spolehlivost. Například jako dílčí výpadky generačních jednotek, mohou mít plánované odstávky přenosových vedení významnější dopad na spolehlivost. Nicméně je velmi málo publikovaných data pro plánovaných odstávky.

Existuje několik vedení, pro které se předpokládá společná trasa či společná struktura nejméně v části jejich délky. Tyto dvojice linek jsou indikovány v obrázku 3.3 kruhy kolem páru vedení, a přidruženými písmeny identifikace. Tabulka 3.17 znázorňuje skutečnou délku společných vedení či společných struktur vedení. Například, vedení z přípojníc 22-21 a 22-17 jsou 47 a 73 míle dlouhé v tomto pořadí. Tabulka ukazuje, že 45 míle této vzdálenosti je na společné trase obou vedení.

Kromě expozice výpadků uvedených v tabulce 3.17 jsou vedení na společné trase nebo společné struktury vystaveny tzv. "Obecném" režimu odstávek, v němž jedna událost způsobí výpadek obou linek. Tady je v současné době velký zájem o data na četnosti takových to souhlasných událostí.

Další důležité data pro přenosové vedení jsou uvedeny v tabulce V přílohy C. Je zde obsažena impedance vedení a také jeho proudová zatížitelnost. Krátkodobé hodnocení signalizuje schopnost zatížení obvodu následující za jedno nebo více systémových událostí počítat s 15 minutami k tomu, aby poskytovaly opravný zásah.

Tab. 3.17. Údaje souběhu vedení

Identifikace společných cest	přípojnice		Společný souběh
	Z	Do	Míle
A	22	21	45
	22	17	45
B	23	20	15
	23	20	15
C	21	18	18
	21	18	18
D	15	21	34
	15	21	34
E	13	11	33
	13	12	33
F	8	10	43
	8	9	43
G	20	19	27,5
	20	19	27,5

3.3 Testovací síť RTS – 96

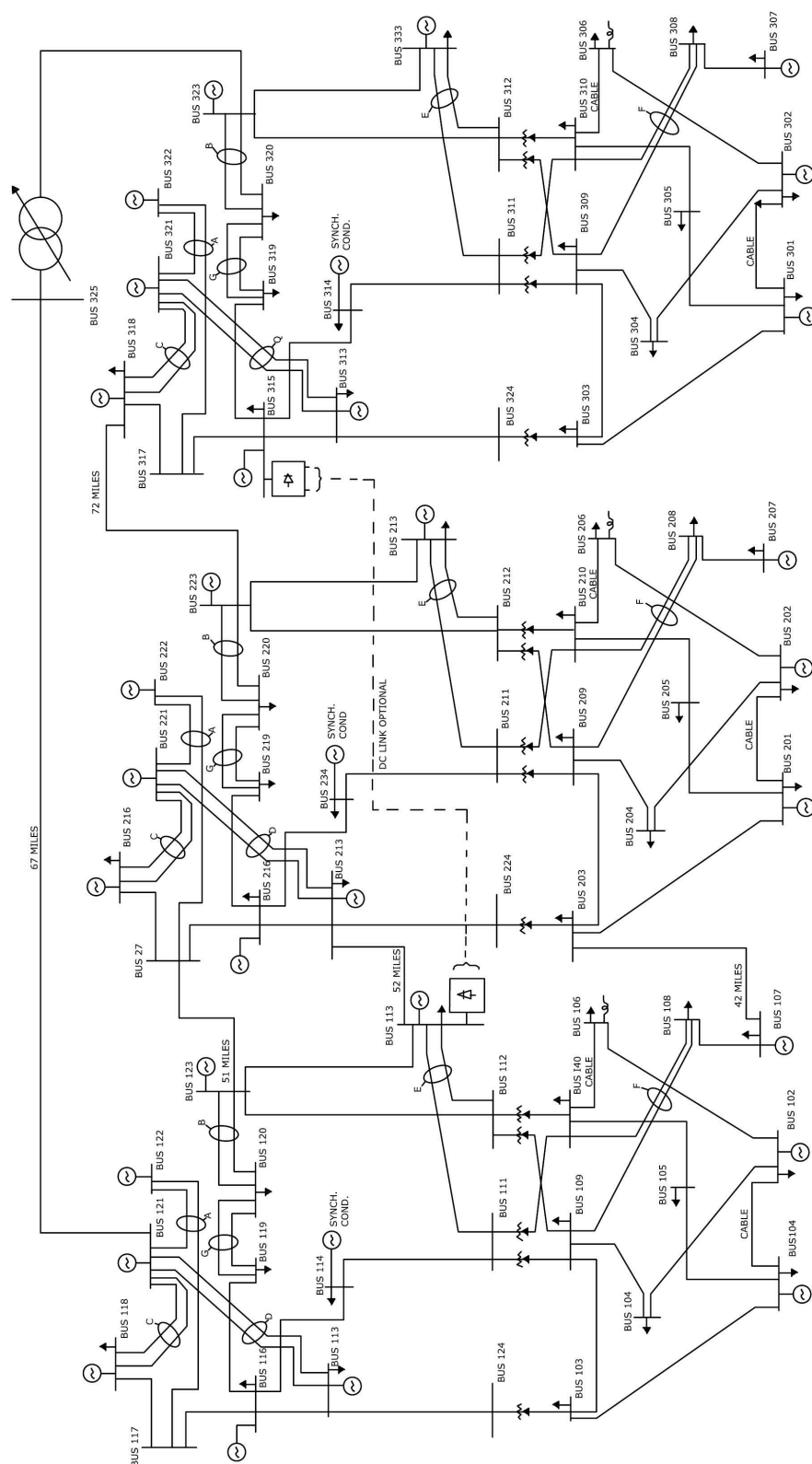
Tato síť popisuje rozšířený testovací systém (RTS-96) pro použití v hodnocení studií hromadné spolehlivosti napájecích sítí. Hodnota testovacího systému umožňuje srovnávací a orientační test studií, které mohou být vykonávány na nových a existujících hodnocení spolehlivostech technikách. Testovací systém byl vyvinutý modifikací a aktualizací originálního IEEE RTS (označovaný jako RTS – 79), za účelem odrážet změny v metodologiích vyhodnocení a překonání nevýhod. Vrchol zatížení systému v intervalech ročního období se předpokládá stejné jako u RTS 79.

3.3.1 Popis RTS 96

Topologie RTS – 79 naznačená na obrázku 3.3 je označena jako oblast A. Následkem pokroků v dostupnosti výpočtů a metodiky byla síť modifikována a rozšířena na více oblastní napájecí síť, která vznikla pospojováním jednotlivých RTS – 79.

Tato síť charakterizuje tři-územní systém připojením druhé a třetí oblasti B a C pomocí spojovacích vedení. Pro spojení oblastí A a B je využito tří vedení mezi přípojnici 123 a 217, 113 a 215, 107 a 203. Vedení k připojení třetí oblasti spojuje B a C pomocí přípojníc 223 a 318, oblast A a C pomocí přípojníc 121 a 325. Transformátor fázového posuvu byl přidán mezi přípojnice 325 a 323 oblasti C. Doplňkové DC spojení spojuje oblast A s oblastí C (přípojnice 113 a 316). Délky jsou naznačeny v obrázku 3.4.

Tabulka I v příloze D popisuje základní data přípojníc pro tři oblasti. Pro oblast A jsou označeny čísla v rozsahu od 101 do 124. Pro oblast B identifikátory v rozsahu od 201 do 224 a pro C čísla v rozsahu od 301 do 325. Navíc se oblasti rozdělují do dílčích oblastí a zón. Předpokládané zatížení přípojníc ukazuje tabulka II. přílohy D.



Obr. 3.4 IEEE RTS 96 vzniklé spojením tří oblastí (A, B a C)

3.3.2 Výrobní systém

V následujících tabulkách jsou popsány aspekty výrobních jednotek. Jelikož jde o propojený systém více RTS 79, hodnoty odpovídají tomuto systému v předchozí kapitole.

Tab. 3.18. Údaje generátorů

Jednotky	Výkon jednotky	Typ	Poruchovost	Doba provozu	Doba poruchy	Plánovaná údržba
	(MW)			(hod)	(hod)	(Týden/rok)
Unit group	Unit Size	Unit type	Force outage rate	MTTF	MTTR	Scheduled Maint.
U12	12	Nafta/pára	0,02	2940	60	2
U20	20	Nafta/CT	0,1	450	50	2
U50	50	Vodní	0,01	1960	20	2
U76	76	Uhlí/pára	0,02	1960	40	3
U100	100	Nafta/pára	0,04	1200	50	3
U155	155	Uhlí/pára	0,04	960	40	4
U197	197	Nafta/pára	0,05	950	50	4
U350	350	Uhlí/pára	0,08	1150	100	5
U400	400	Jaderná	0,12	1100	150	6

3.3.3 Přenosový systém

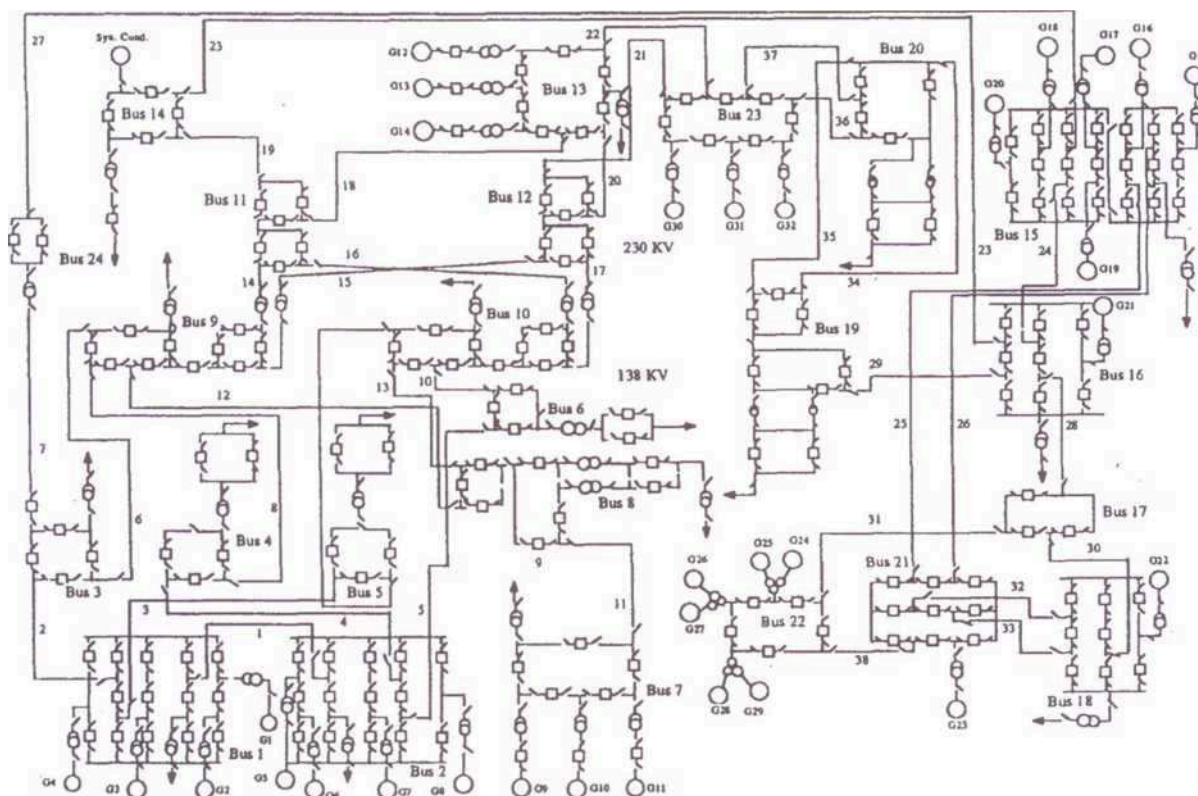
Rozšířený přenosový systém zahrnuje měnič fázového posunu (Shift), dva terminály DC vedení. Tabulka III přílohy D poskytuje ukazatele přenosového vedení. Toto zahrnuje vedení, kabely, transformátory, Shift trafo a souběžné vedení. Vše je vztaženo na p.u. 100 MVA základu. Oblasti A a B může být také spojena stejnosměrným vedením [12]. Jednotlivé údaje tabulky jsou vysvětleny níže. V příloze D znázorňují tabulky IV a V údaje pro stejnosměrný provoz a také pro koncové terminály tohoto spojení.

ID#	identifikátor větvi
	Mezi - územní větve jsou indikovány dvojím písmenem ID
	Okruhy na společných stožárech spojené ID#
λ_p	Permanentní četnost výpadků (výpadek/rok)
Dur	Permanentní doba výpadku (hod)
λ_t	Přechodná četnost výpadků (výpadek/rok)
Con	Trvalé zatížení
LTE	Dlouhodobý nouzový výkon (nedotknutelná zásoba po 24 hod.)
STE	Krátkodobý nouzový výkon (15 min.)
Tr	Transformátor nominální převod, větve transformátoru jsou označeny od Tr $\neq 0$

Souběžné vedení (ROW) či vedení se společnou strukturou (CS) jsou indikované smyčkami A – G. Společné délky (míle) jsou následující: A – 45 (ROW), B-15 (CS), C – 18 (CS), D – 34 (ROW), E – 33 (CS), F – 43 (CS), G – 19 (CS).

3.3.4 Staniční komponenty

Podklad pro data rozvoden je v literatuře [13]. Obr. 3.5 ukazuje schéma zapojení rozvoden. Hodnoty ukazatelů jak pro sekci přípojníc, tak pro výkonové vypínače jsou uvedeny v tabulce 3.15 a 3.16 předchozí kapitoly.



Obr. 3.5. Schéma rozvodny jedné oblasti systému

Pro zajímavost jsou v příloze E uvedeny náklady na provoz elektrárenských bloků pro všechny tři typy testovacích sítí.

4 Model sítě v IEEE RTS v programu KomplexSpoleh

Model je vytvořený pro dvě varianty, jestliže uvážíme vliv souběhu vedení a bez jeho uvážení. Pro tyto dvě varianty bylo použito hodnot získaných z publikací RTS – 79 [10] a ukazatelů podle ČEZ 22/80. U hodnot ze RTS nebyly definovány odstávky vlivem údržby, proto se model vytvořil bez jejího vlivu.

4.1 Popis programu KomplexSpoleh

Program KomplexSpoleh řeší spolehlivost elektrických sítí všech napětových úrovní od přenosové soustavy až po síť NN. Jako vstupní údaje jsou zadávány spolehlivostní údaje jednotlivých uzlů a větví. Program zahrnuje do výpočtu také výkonovou bilanci, proto je nutné u každého uzlu zadat rovněž odebíraný (dodávaný) výkon a u každé větve její výkonovou zatížitelnost.[14]

Do výpočtu lze zadávat větve jako:

- Klasické
- Studená rezerva R (se stejnými spolehlivostními parametry jako větev hlavní)
- Studená rezerva Z (s jinými spolehlivostními parametry než větev hlavní)
- Odbočky vedení typu T

Program KomplexSPOLEH umožňuje zadat celou síť včetně všech napájecích oblastí (hlavních i záložních) a provést příslušný výpočet spolehlivosti. Dále umožňuje zadat více bodů ve spolehlivostním schématu, do kterých pracují jak hlavní oblast tak záložní oblasti. Do každého manipulačního bodu (tj. do bodu, kde je připojena hlavní napájecí oblast a záložní oblast) je možno simulovat připojení jedné hlavní napájecí oblasti a dvou záložních napájecích oblastí. Toto omezení vyplývá z praktických zadání spolehlivostních úloh, kdy se v některých případech vyskytují dvě napájecí oblasti (hlavní a záložní), zřídka pak tři napájecí oblasti (hlavní a dvě záložní). Výsledkem výpočtu je pak celková výkonová bilance řešené sítě a výsledné spolehlivostní parametry všech uzlů.

Dále program určí pro jednotlivé uzly pravděpodobně nedodanou elektrickou energii a celkovou hodnotu pravděpodobně nedodané elektrické energie v uzlech. [14]

Rozsah programu umožňuje počítat síť s 10 hlavními oblastmi, 200 uzly a 400 větvemi. Pokud není tento rozsah počítané sítě splněn, mohou autoři tento počet zvýšit. [14]

Výpočet je proveden metodou simulace Monte Carlo. Na počátku simulace se předpokládá, že všechny prvky sítě jsou v chodu. Je tedy potřeba pro každý prvek vygenerovat náhodnou veličinu reprezentující okamžik jeho výpadku. Z vygenerovaných veličin se vybírá ta nejmenší, v modelu se provede příslušná změna a vyhodnotí se nový stav soustavy. Pro prvek, jehož se změna týkala, se vygeneruje nová hodnota – tentokrát uvedení do provozu, a zařadí se do fronty čekajících událostí. Systémový čas se posune do nového bodu tzv. okamžiku změny. Z fronty čekajících událostí se vybere ta první a celý děj se opakuje, dokud není proveden patřičný počet pokusů. [14]

Vstupní hodnoty lze zadávat buďto přímo do programu, nebo pomocí šablony v sešitu Microsoft Office Excel.

Výsledkem simulace po provedení daného počtu simulací je vyhodnocení spolehlivosti větví a spolehlivosti uzlů.

- a) spolehlivost uzlu – Abychom byli schopni rozhodnout, zda je uzel v normálním chodu nebo ve výpadku, musí se v každém kroku simulace vyhodnocovat stav celé sítě. Má-li uzel odběr P_i a součet zatížitelnosti větví vedoucích do tohoto uzlu ΣP_{ij} je větší než tento odběr je vše v pořádku. V opačném případě bude program brát tento uzel jako odpojený. Dále je třeba zadávat směr toku přenášeného výkonu větve. Je nutno si uvědomit, že se jedná o větev modelu, s fyzikální schopnosti větve přenášet výkon to nesouvisí. [14]
- b) spolehlivost větví – tím se rozumí zapojení definované uživatelem, kde funkci větve může plnit např. přenosové vedení nebo generátor mezi dvěma uzly (přípojnici), paralelní vedení, atd. [14]

Podrobný návod k řešení spolehlivostních sítí v programu komplex spoleh je uveden v literatuře [1] a [14].

4.2 Mode síť RTS 79

4.2.1 Vstupní údaje

Síť je vyobrazena na obrázku 3.3 třetí kapitoly. Popis je rovněž uveden ve třetí kapitole a příloze C, s ukazateli potřebnými jako vstupní data programu komplex spoleh. Při sečtení výkonu vyrobeného všemi jednotkami (3405) a výkonu odebraného odběrovými přípojnici (2850 MW) je patný přebytek dodávky výkonu. To má za následek, že by neměl být žádný uzel odpojen programem (viz popis KomlexSpoleh), tedy pokud má vedení dostatečnou přenosovou schopnost. Použité tabulky pro implementaci hodnot do programu jsou následující:

- a) Tabulka 3.10 výpadky generátorů – z tabulky je třeba dopočítat hodnoty intenzity poruch generátorů a také parametry údržby. Pro intenzitu výpadku λ_{Gi} je využito vztahu
$$\lambda_{Gi} = \frac{1}{MTTF_{Gi}}$$
 a pro ukazatele údržby je hodnoty třeba dopočítat s týdnů/rok v údržbě.
- b) Tabulka 3.11 rozdělení výrobních jednotek na přípojnice
- c) Tabulka III. Přílohy C – zatížení jednotlivých přípojníc – síť je možné modelovat jak s výpadky generátorů, tak bez těchto výpadků. Toho je docíleno odečtením odběru na dané přípojnici od vyrobeného výkonu (dodávaného), a pak se tato přípojnice tedy bude zadávat jako zdroj v sešitu Excel. Pro výkon uvažujeme účinník 0,98. V této práci se uvažoval pouze vliv s výpadky generátorů.
- d) Tabulka IV přílohy C ukazatele výpadků pro jednotlivé vedení

- e) Tabulka 3.17 s údaji o souběhu vedení – rozbor pro souběh vedení je uveden níže. Na obr. 3.3 je zaznačen velkými písmeny A-G.
- f) Tabulka V přílohy C zatížitelnost vedení

Pro model bylo použito:

- Vrcholového zatížení generátorů a odběrových přípojníc
- Dlouhodobé zatížitelnosti vedení.
- Předpokládaný účinník pro zatížení přípojníc $\cos \varphi = 0,98$. Zatížitelnost vedení je definovaná zdánlivým výkonem [MVA], bylo nutné přepočítat pomocí vztahu:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (\text{MW}) \quad (4.2.1.1)$$
- Výpadky generátorů byly do sešitu Excel vloženy jako větve mezi přípojnici výrobní a přípojnici odběrovou (pokud tedy má tato přípojnice odběr.
- Přepočet délky s míle, na kilometr (1 míle = 1,609 km)
- Kompenzační zařízení nejsou uvažována.
- Souběh vedení se předpokládá po celé trase, kromě vedení označené smyčkou A.

4.2.2 Vstupní spolehlivostní hodnoty podle směrnice ČEZ 22/80

Pro výpočty spolehlivostních údajů se jako vstupní údaje používají hodnoty vycházející z přílohy vyhlášky 22/80 ČEZ. Následující tabulka udává ukazatele potřebné k vytvoření modelu pomocí těchto hodnot. Kompletní tabulka je uvedena v literatuře [1]. Je snahou tyto hodnoty zaktualizovat a nahradit přesnějšími ukazateli.

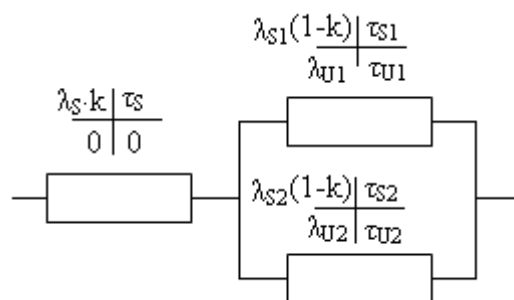
Tab. 4.1. Vstupní hodnoty spolehlivosti podle 22/80 ČEZ

Prvek	Napětí (kV)	λ_p (rok ⁻¹)	τ_p (h)	λ_U (rok ⁻¹)	τ_U (h)
Transformátor	220/110	0,02/100 km	300	1	360/km
Venkovní vedení	220	2,3	6	1	2
	110	5,2	3,5	1	4
Kabelové vedení	110	2	50	0	0

Ukazatele λ_p a τ_U které jsou vztaženy k uřčené délce, je proto potřeba přepočítat podle skutečných délek sítě RTS 79.

4.2.3 Varianta s uvažováním souběhu vedení

Souběh je tvořen sérioparalelním zapojením prvků. Parametrem souběhu je činitel k , který znázorňuje výpadek obou vedení současně. Implementováno do programu spoleh podle obr. 4.1. Paralelní část obrázku znázorňuje četnost poruch a údržbu pro každé ze souběžných vedení zvlášť. Sériový prvek definuje společnou poruchu pro obě vedení. Např. jestliže budeme uvažovat $k=1$, a jestliže nastane výpadek jednoho vedení, bude ve výpadku i druhé. Dále je třeba brát v potaz přenosovou schopnost vedení, která může být pod rozsahem přenášeného výkonu, jestliže bude v provozu jen jedno vedení.



Obr. 4.1 Schéma pro souběžné vedení RTS 79

Souběh byl v programu definován hodnotou $k = 0,9$. Dále bylo třeba přepočítat ukazatele některých vedení, u nichž není souběh po celé délce mezi přípojnici, nebo kde se vedení rozdělují, a každé směřuje k jiné přípojnici (viz obr. 3.3). To platí pouze v případě souběžného vedení s identifikátorem A, u kterého jsou délky jednotlivých vedení podstatné. Doby trvání výpadku jsou uvedeny v tabulce 3.14 kapitoly 3.

Ukazatele se přepočítají pomocí vztahů:

Pro intenzitu poruch:

$$230kV \text{ vedení} : \lambda_p = 0,34L + 0,29 \quad (4.2.3.1)$$

Pro dobu trvání výpadku:

$$R = (\lambda_1 \cdot R_1 + \lambda_2 \cdot R_2) / (\lambda_1 + \lambda_2) \quad (4.2.3.2)$$

Kde:

L je délka linky či kabelu na 100 mil. Konstanta v každé rovnosti odpovídá za chyby na koncovém zařízení spínaném s linkou.

λ_1, R_1 vedení/kabel četnost výpadku a trvání výpadku

λ_1, R_1 terminálová četnost výpadku a trvání výpadku

Pro souběh vedení A tedy platí:

- Délka souběhu = 45 mil
- Délka vedení mezi přípojnici 22 a 17 = 73 mil (28 mil jako jednotlivé vedení)
- Délka vedení mezi přípojnici 22 a 21 = 47 mil (2 mil jako jednotlivé vedení, zanedbáváme)

Pro délku 28mil vypočítáme intenzitu a trvání poruchy podle výše uvedených vztahů:

$$\lambda_p = 0,34 \cdot \frac{28}{100} + 0,29 = 0,386 \quad (\text{rok}^{-1})$$

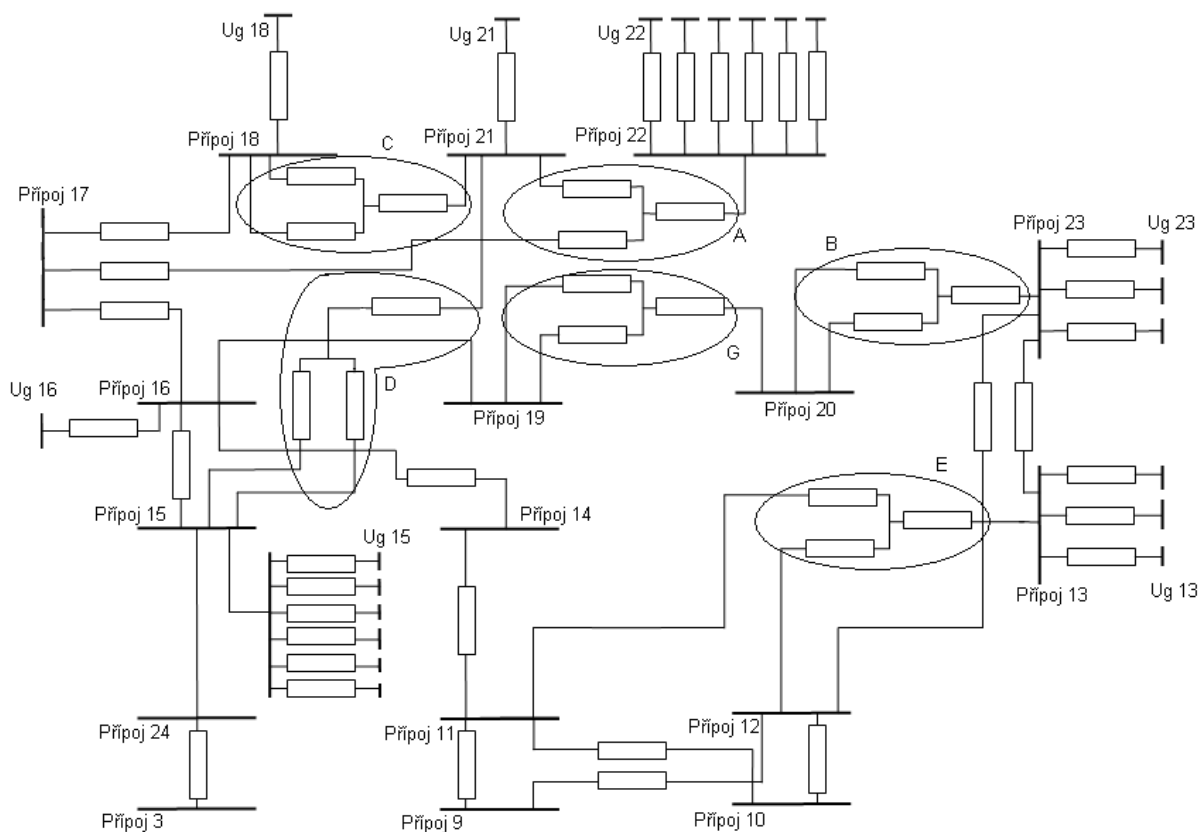
$$\tau_p = \frac{(0,386 \cdot 18) + (0,29 \cdot 8)}{0,386 + 0,29} = 13,7 \quad (\text{hod})$$

Intenzitu a trvání výpadku jednotlivých vedení v souběhu délky 45mil lze vypočítat podle vztahů:

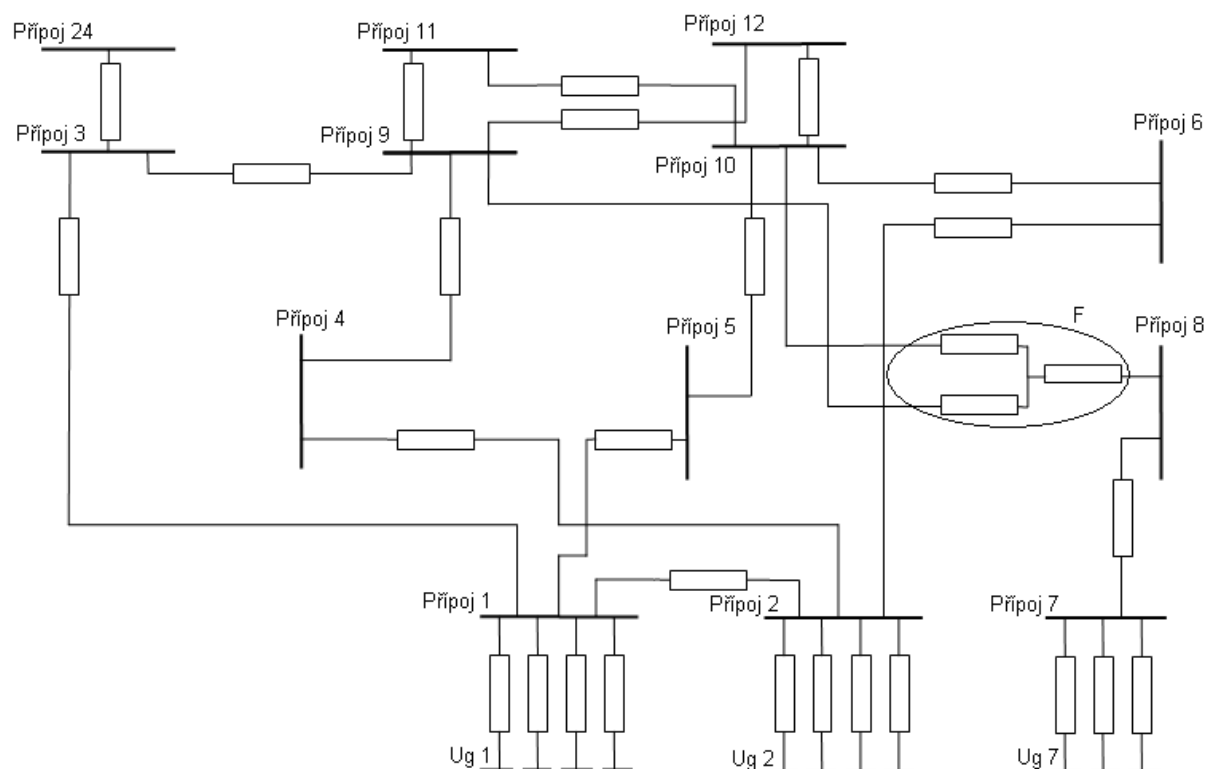
$$\lambda_{ps} = 0,34 \cdot \frac{45}{100} + 0,29 = 0,44 \quad (\text{rok}^{-1})$$

$$\tau_{ps} = \frac{(0,44 \cdot 18) + (0,29 \cdot 8)}{0,44 + 0,29} = 14 \quad (\text{hod})$$

Ukazatele jednotlivých vedení v souběhu λ_{ps} se dosazují do modelu vytvořeného v sešitu Excel podle obr. 4.1. Pro výpočet času opravy τ_i pro jednotlivé vedení se používá průměrná délka vedení v testovacím systému pro každé ze dvou napětí pro výpočet jedné (průměrné) hodnoty. Tj. pro hodnotu napětí 230kV je 11hod pro hodnoty z RTS 79. Na obrázku 4.2 a 4.3 je naznačeno spolehlivostní schéma s uvažováním souběhu vedení, které je nahrazeno sérioparalelním spojením prvků.



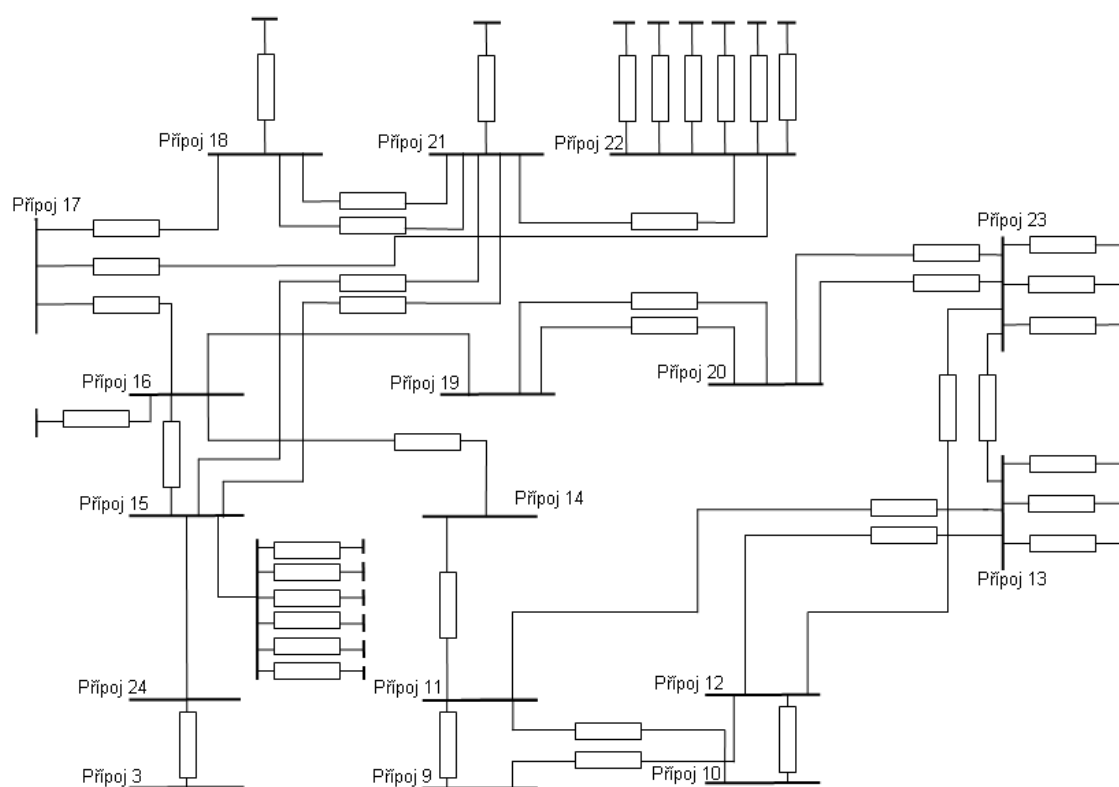
Obr. 4.2. Spolehlivostní schéma horní části (238kV) IEEE RTS 79 uvažováním souběhu vedení



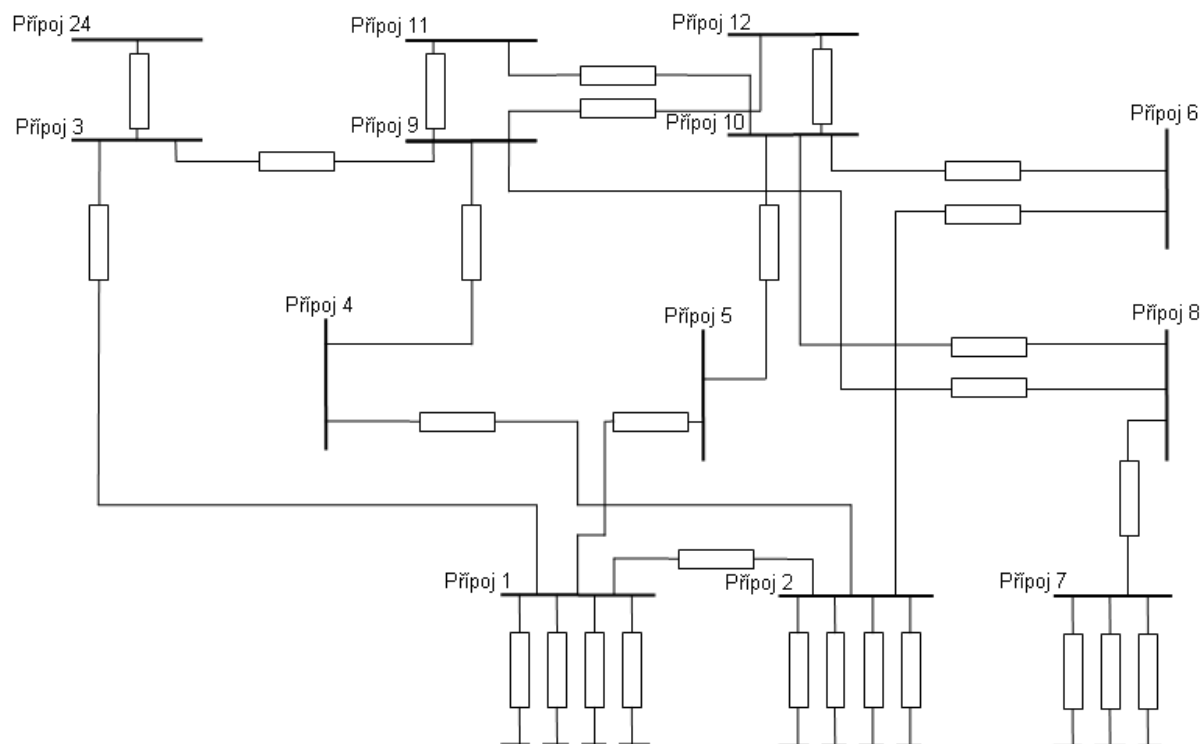
Obr. 4.3. Spolehlivostní schéma dolní části (138kV) IEEE RTS 79 s uvažováním souběhu vedení

4.2.4 Varianta bez uvažování souběhu vedení

V této variantě uvažujeme výpadky vedení zaznačených smyčkami A-G v obr. 3.3 jako jednotlivé vedení, které se navzájem neovlivňují.



Obr. 4.4 Spolehlivostní schéma horní části (238kV) IEEE RTS 79 bez uvažování souběhu vedení



Obr. 4.5 Spolehlivostní schéma horní části (238kV) IEEE RTS 79 bez uvažování souběhu vedení

4.2.5 Model sítě vytvořený v sešitu Excel

Do sešitu se zadávají jak výrobní, tak odběrové uzly. Přičemž výrobní uzly musí mít předřazené znaménko mínus. Postup zadávání prků je určen spolehlivostním schématem uvedeným v této kapitole. V příloze bude uveden pouze model vytvořený v sešitu Excel pro variantu s uvažováním souběhu vedení (ostatní varianty jsou nahrány na disk CD, přiložený k této práci). Postup pro ostatní varianty je stejný. Vytvoří se spolehlivostní schéma, kde každému prvku sítě RTS 79 je přiřazený prvek spolehlivostní s ukazateli, které definují jeho provozuschopnost. Prvek s těmito hodnotami se tak modeluje v programu Excel.

Tab. 4.2. Zadávání uzlů (část tabulky pro ilustraci)

Jméno	λ_p	τ_p	λ_u	τ_u	Čas v chodu	Čas ve výpadku	Počet	Odběr	Tmax
uzlu	[rok ⁻¹]	[h]	[rok ⁻¹]	[h]	[rok]	[rok]	výpadků	[MW]	[h.rok ⁻¹]
U1								108	8760
U2								97	8760
U3								180	8760
U4								74	8760
U5								71	8760
U6								136	8760
U7								125	8760
U8								171	8760

Pozn. Kompletní tabulka je uvedena v příloze F (tabulka I)

Větve spojují jednotlivé uzly podle určeného schématu. Výrobní jednotky jsou taktéž vloženy jako samostatné větve pracující do přípojnice společné pro daný okruh výroby podle tab.3.11.

Tab. 4.3 Zadávání větví (část tabulky pro ilustraci)

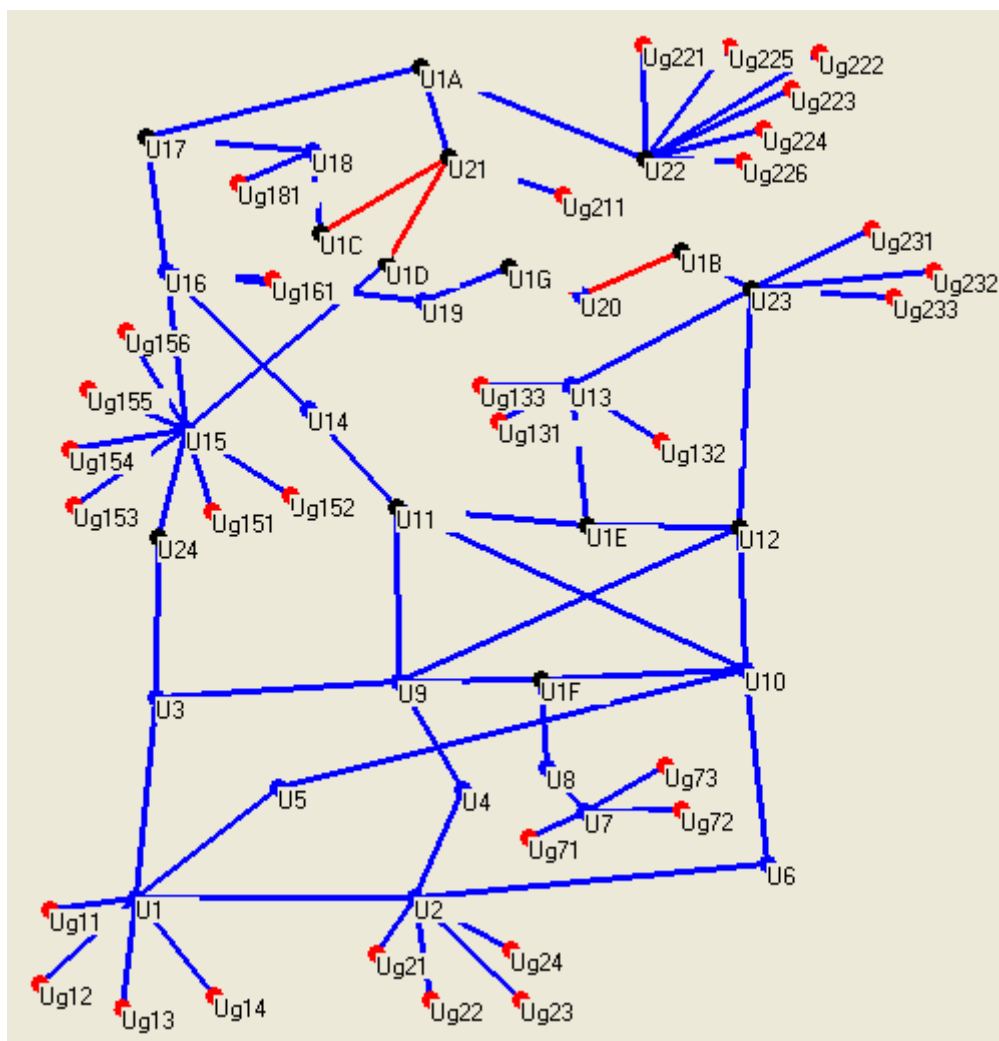
Typ větve	Jméno větve (oblasti)	Z	Do	Jednosměrná	λ_p	τ_p	λ_u	τ_u	Zatížitelnost
		uzlu			[rok ⁻¹]	[h]	[rok ⁻¹]	[h]	[MW]
V	V1	U1	U2	NEPRAVDA	0,24	16	0	0	183,35
V	V2	U1	U3	NEPRAVDA	0,51	10	0	0	197,6
V	V3	U1	U5	NEPRAVDA	0,33	10	0	0	197,6
V	V4	U2	U4	NEPRAVDA	0,39	10	0	0	197,6
V	V5	U2	U6	NEPRAVDA	0,48	10	0	0	197,6
V	V6	U3	U9	NEPRAVDA	0,38	10	0	0	197,6
V	V7t	U3	U24	NEPRAVDA	0,02	768	0	0	484,5

Pozn. Kompletní tabulka je uvedena v příloze F (tabulka II)

Intenzita údržby a její doba trvání nebyla uvedena v publikacích pro RTS 79. Proto se v modelu dosazují za tyto ukazatele nulové hodnoty. Jak je uvedeno níže, výsledky získané s uvažováním ukazatelů údržby bez jejího uvažování se podstatně liší.

5 Spolehlivostní výpočet variant zapojení sítě

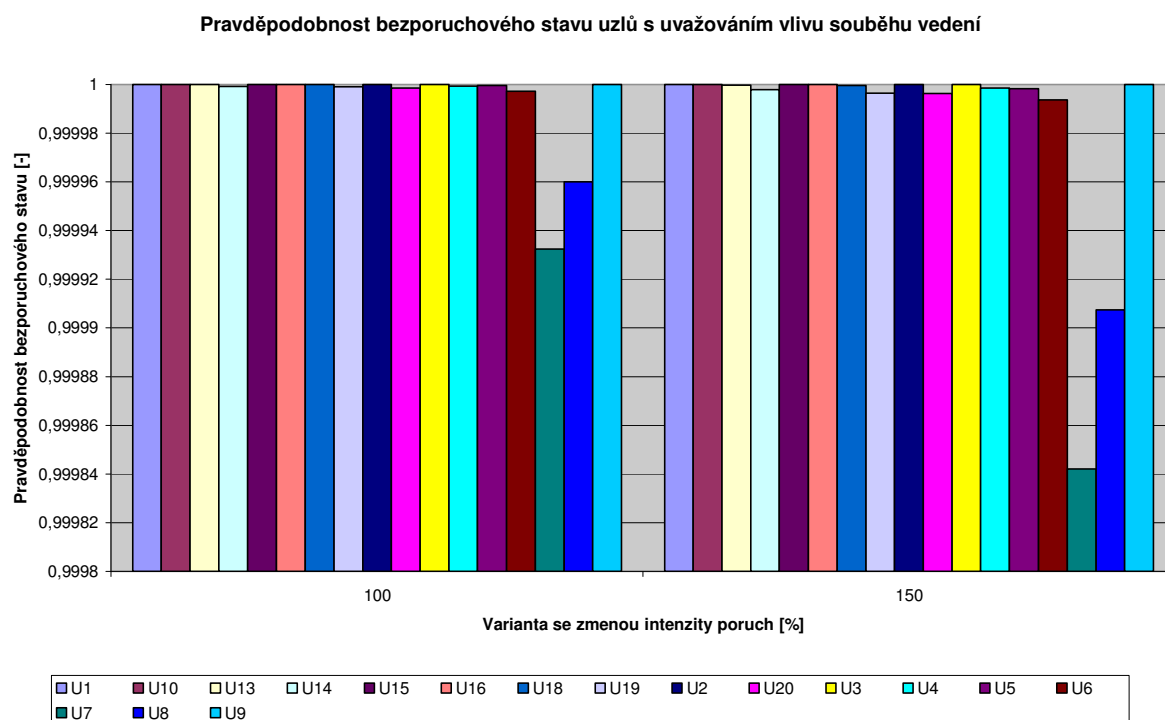
Obr. 5.1 vyobrazuje spolehlivostní model, který vygeneroval programem KomplexSpoleh ze šablony vytvořené v sešitu Excel. Tento model zapojení generuje model s uvažováním souběhu dvou vedení. Čísla přípojníc odpovídají identifikátorům spolehlivostního schématu na obr. 4.2 a 4.3.



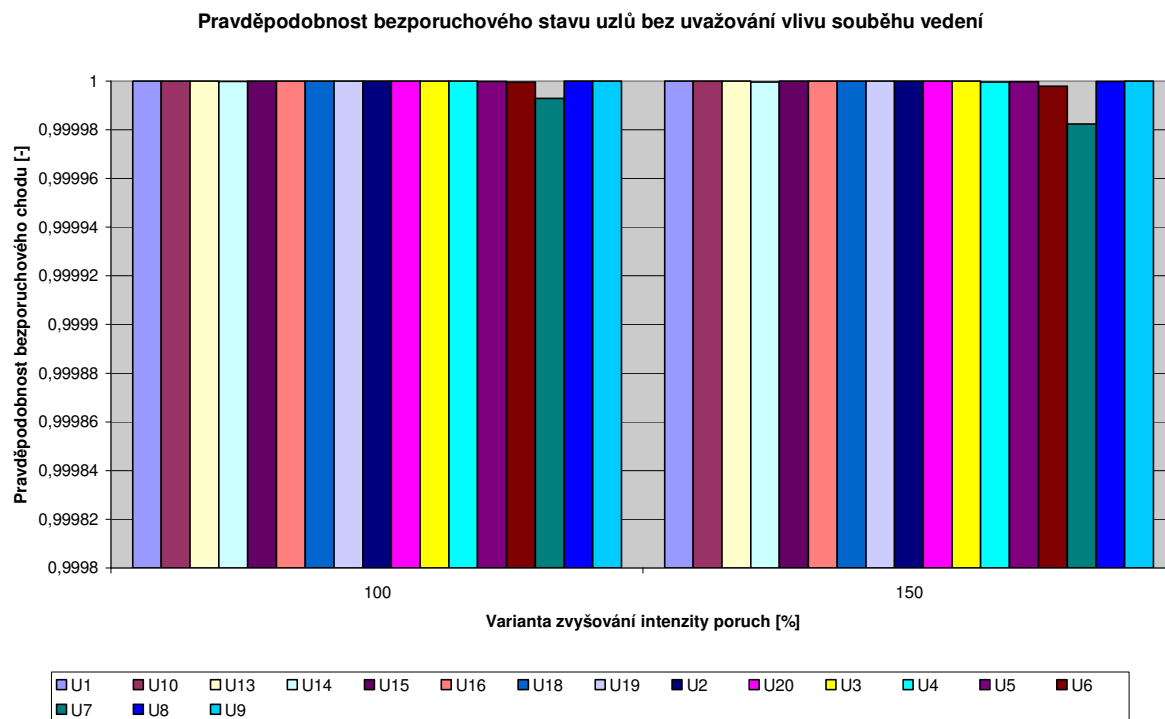
Obr. 5.1 Generované schéma programem KomplexSpoleh

5.1 Použití poruchových ukazatelů publikovaných v RTS 79

Vyhodnocení této varianty využívá údaje, na které poukazuje kapitola 4.2.1. Výsledkem je porovnání dvou případů, a to případ se začleněním vlivu souběhu vedení do modelu a případ se zanedbáním tohoto vlivu. V každém modelu bylo navíc simulováno zvýšení intenzity poruch o padesát a sto procent. Do grafů je ale zahrnuto pouze první zmiňované navýšení o padesát procent. Veškeré provedené simulace jsou doloženy na přiloženém disku CD.



Obr. 5.2. Graf závislosti intenzity poruch na pravděpodobnost bezporuchového stavu odběrových uzlů pro vliv souběhu vedení.



Obr. 5.3. Graf závislosti intenzity poruch na pravděpodobnost bezporuchového uzlů stavu pro jednotlivá vedení bez uvažování souběhu.

5.1.1 Porovnání spolehlivosti jednotlivých variant

Obr. 5.2 byl získán jestliže uvažujeme souběh vedení, označený smyčkami A-G ve spolehlivostním schématu obr. 4.2 a obr. 4.3. Z grafu byly odebrány neodběrové přípojnice a uzly modelované pro souběh vedení. Přípojnice s nejnižší spolehlivostní hodnotou jsou přípojnice 7, 8, 6, 4 a 5 (hodnoty jsou odstupňované v tomto pořadí). Při zvýšení intenzity poruch λ_p o padesát procent je parná změna i na ostatních přípojnicích. Hodnoty uzlů, u kterých není viditelná snížená grafická hodnota (maximum se nachází v hodnotě jedna) se ukazatel pravděpodobnosti bezporuchového stavu blíží téměř jedné.

Obrázek 5.3 znázorňuje spolehlivost uzlů, jestliže neuvažujeme vliv souběhu vedení, ale jednotlivé vedení mezi příslušnými přípojnici.

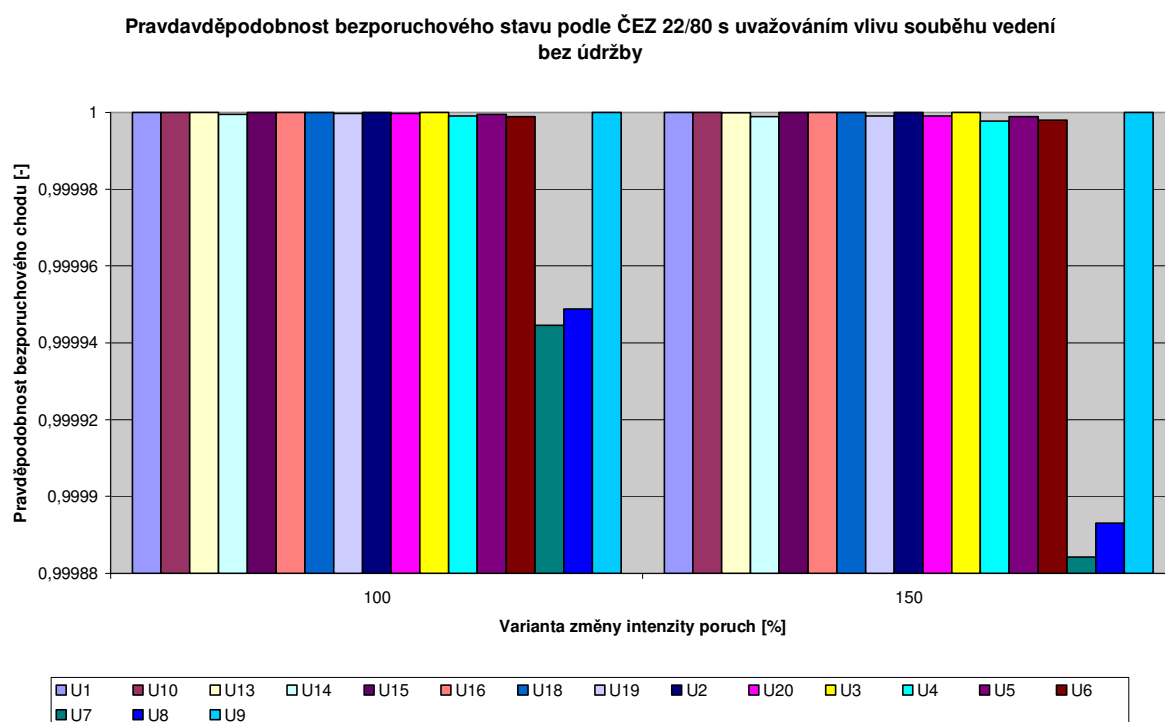
Z porovnání obou grafů 5.2 a 5.3 je patrný vliv, jestliže budeme zvažovat zahrnutí souběhu vedení do výpočtu. Model bez uvažování vlivu spolehlivosti se jeví téměř nadmíru spolehlivý, jelikož výstupní ukazatele nejsou téměř ovlivněny (vyjma uzlů 6 a 7) ani zvýšením intenzity poruch o padesát procent. Výstupní hodnoty jednotlivých modelů z programu KomplexSpoleh jsou uvedeny na přiloženém disku. Nesmíme opomenout, že do tohoto hodnocení není zahrnuta údržba, pro níž nebyly publikovány příslušné ukazatele.

Tabulky III a IV přílohy F udávají výsledné spolehlivosti odběrových uzlů a větví pro variantu s uvažováním vlivu souběhu vedení. Celkový počet provedených iterací byl deset miliónu. Roční nedodávka energie byla vyčíslena na 0,143165 GWh. V tabulce 5.1 této kapitoly je zhodnocení nedodané energie pro všechny simulace.

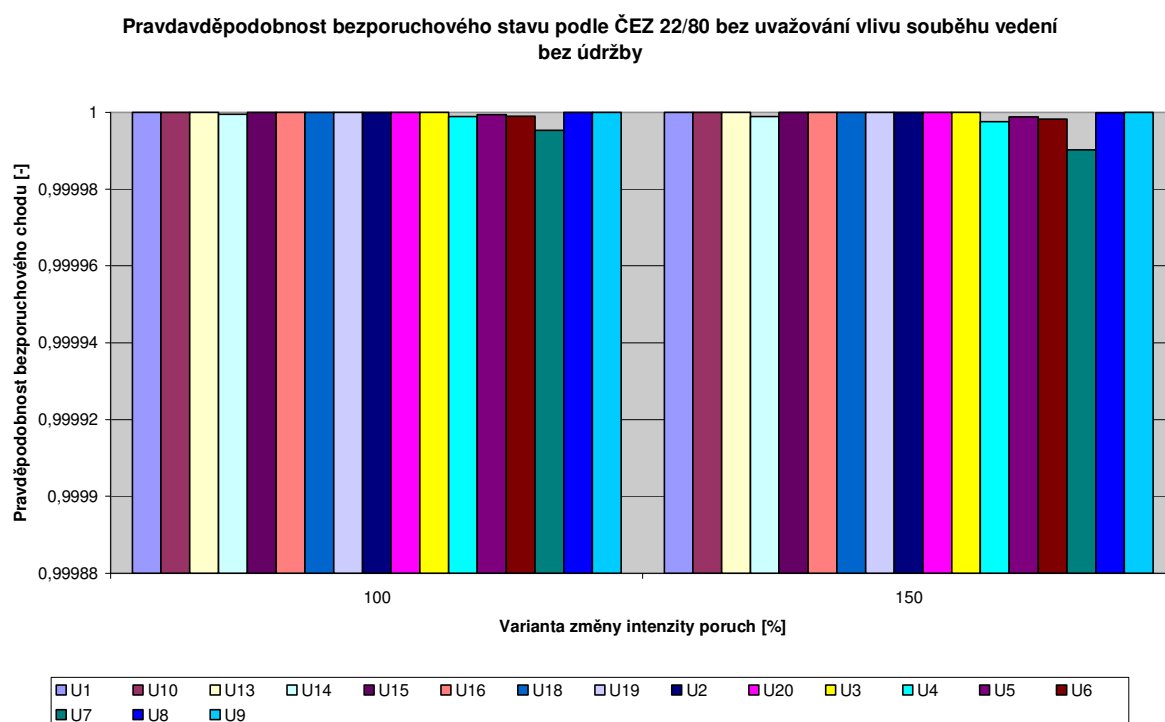
5.2 Použití poruchových ukazatelů podle směrnice ČEZ 22/80

Pro použití ukazatelů podle ČEZ 22/80 je postup stejný jako u předchozí simulace podle RTS hodnot. S tím rozdílem, že pro každou variantu, jak s uvažováním souběhu, tak bez něj, byly výsledky hodnoceny s použitím spolehlivostního modelu, který zahrnuje odstávky vlivem údržby a bez nich.

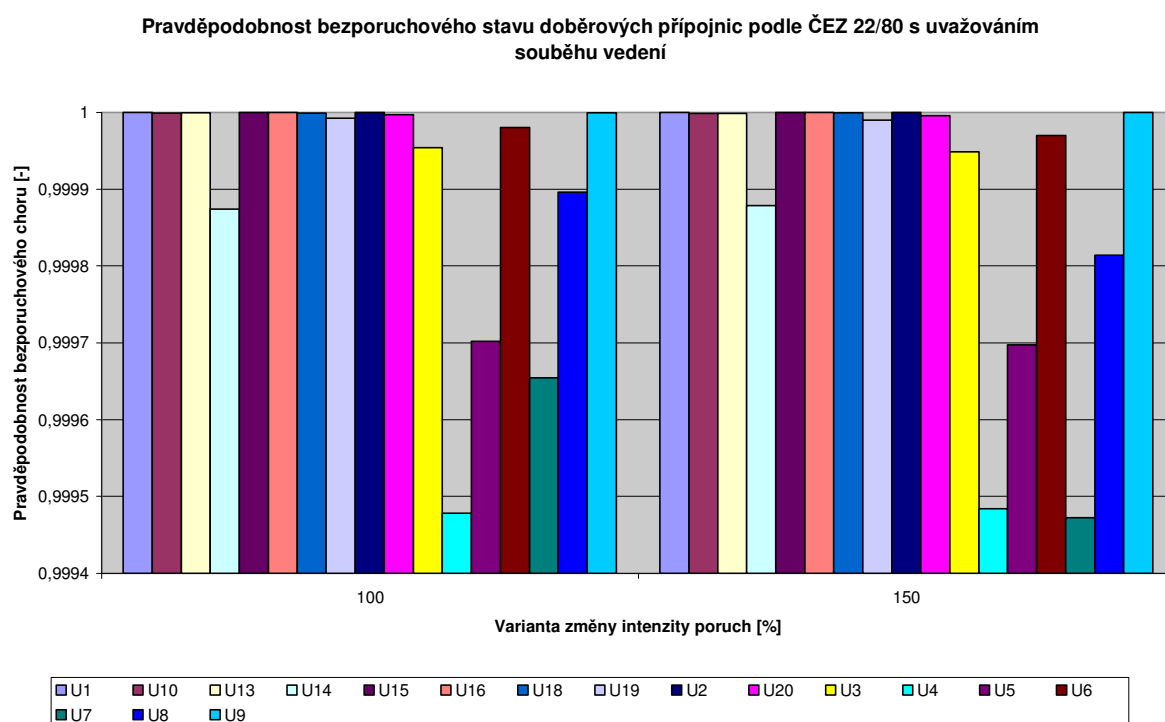
Po znázorněných obrázcích následuje srovnávací tabulka 5.1, v níž se porovnávají indexy roční nedodané energie pro všechny zmíněné varianty. Všechny simulace v programu KomplexSpoleh probíhaly pro 10 miliónu iterací.



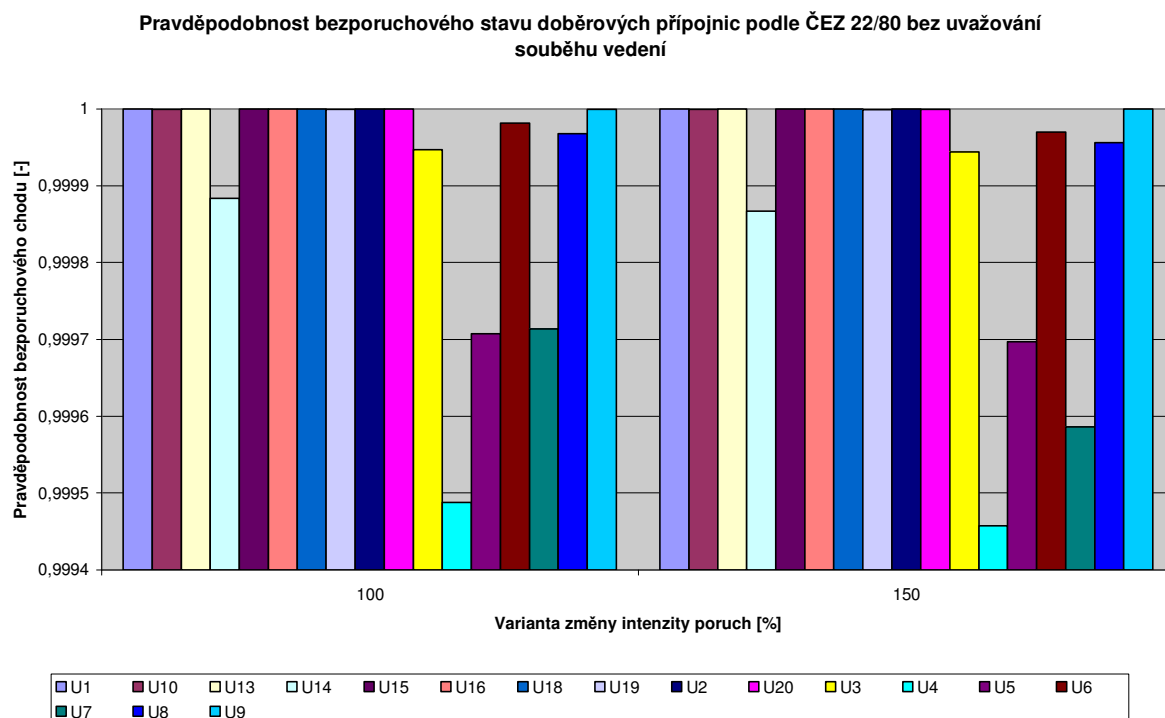
Obr. 5.4. Graf závislosti intenzity poruch na pravděpodobnost bezporuchového stavů uzlů s uvažováním souběhu pro hodnoty ČEZ 22/80, bez ukazatelů údržby.



Obr. 5.5. Graf závislosti intenzity poruch na pravděpodobnost bezporuchového stavů uzlů s uvažováním souběhu pro hodnoty ČEZ 22/80, bez ukazatelů údržby.



Obr. 5.6. Graf závislosti intenzity poruch na pravděpodobnost bezporuchového stavů uzlů s uvažováním souběhu pro hodnoty ČEZ 22/80, a se zahrnutím ukazatelů údržby.



Obr. 5.7. Graf závislosti intenzity poruch na pravděpodobnost bezporuchového stavů uzlů bez uvažování souběhu vedení pro hodnoty ČEZ 22/80, a se zahrnutím ukazatelů údržby.

Obr. 5.4 a 5.5 naskytuje srovnání s použitím poruchových ukazatelů vedení podle ČEZ 22/80 bez uvažování údržby. Z grafů byly odebrány neodběrové přípojnice a přípojnice pro model souběhu vedení. Je zde patrný vliv, jestliže uvážíme souběh vedení, tak pravděpodobnost bezporuchového stavu se snižuje. Nejméně spolehlivé se jeví uzly 7 a 8, které ovlivňuje vliv souběhu vedení. Dále je patrný tento vliv na přípojnicích 19 a 20, jejíž hodnota se také výrazněji mění. S porovnáním obou vstupních ukazatelů (RTS, ČEZ 22/80) vychází o něco lépe spolehlivost hodnot dosazovaných podle ČEZ 22/80, avšak rozdíl není výraznější.

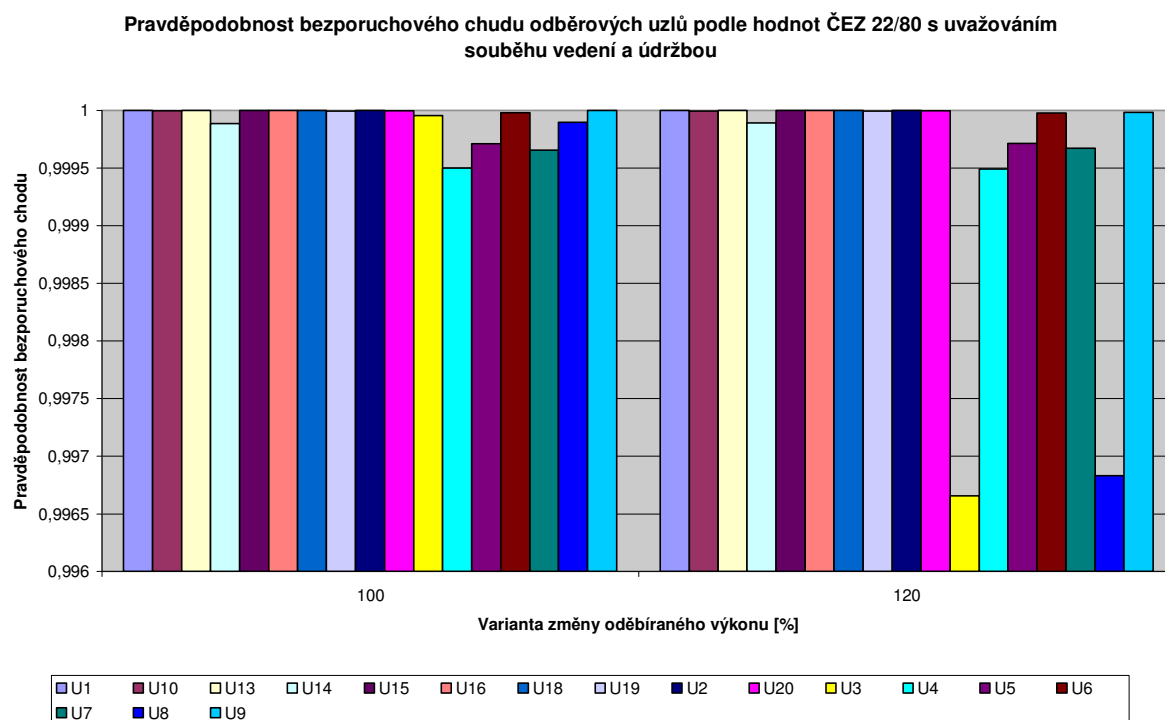
Jestliže budou zohledněny odstávky způsobené údržbou, je zde další faktor ovlivňující spolehlivost systému. Na obr. 5.6 a 5.7 jsou vykresleny grafické průběhy bezporuchového stavu s uvážením údržby a vlivu souběhu vedení. Srovnáním obr. bez zahrnutí údržby se hodnoty spolehlivosti snížily téměř o desetinné místo o jednotku tisíciny.

Tabulka 5.1 srovnává dosud vyhodnocené varianty a jejich ukazatele nedodané energie. Z tabulky je patrný náhled pro spolehlivost různých modelů.

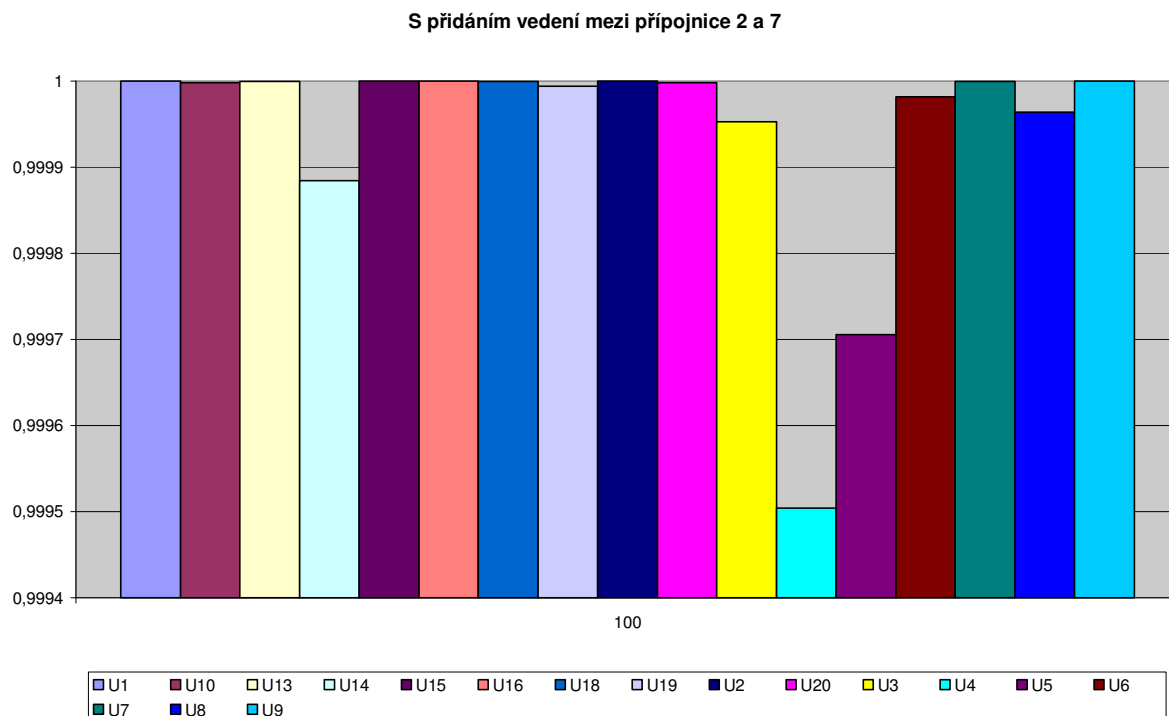
Tab. 5.1 Srovnání ročního ukazatele nedodávky elektrické energie

Použité ukazatele	Intenzita poruch	Roční nedodávka energie [GWh]			
	λ_p [%]	Bez uvažování údržby		S uvažováním údržby	
		S uvažováním souběhu vedení	Bez uvažování souběhu vedení	S uvažováním souběhu vedení	Bez uvažování souběhu vedení
Hodnocení podle RTS	100	0,1431	0,0085	-	-
	150	0,33714	0,023238	-	-
	200	0,57929	0,42851	-	-
Hodnocení podle ČEZ 22/80	100	0,1212	0,008389	1,39138	1,18238
	150	0,29621	0,01726	1,73108	1,41209
	200	0,52005	0,0304	2,18794	1,59756

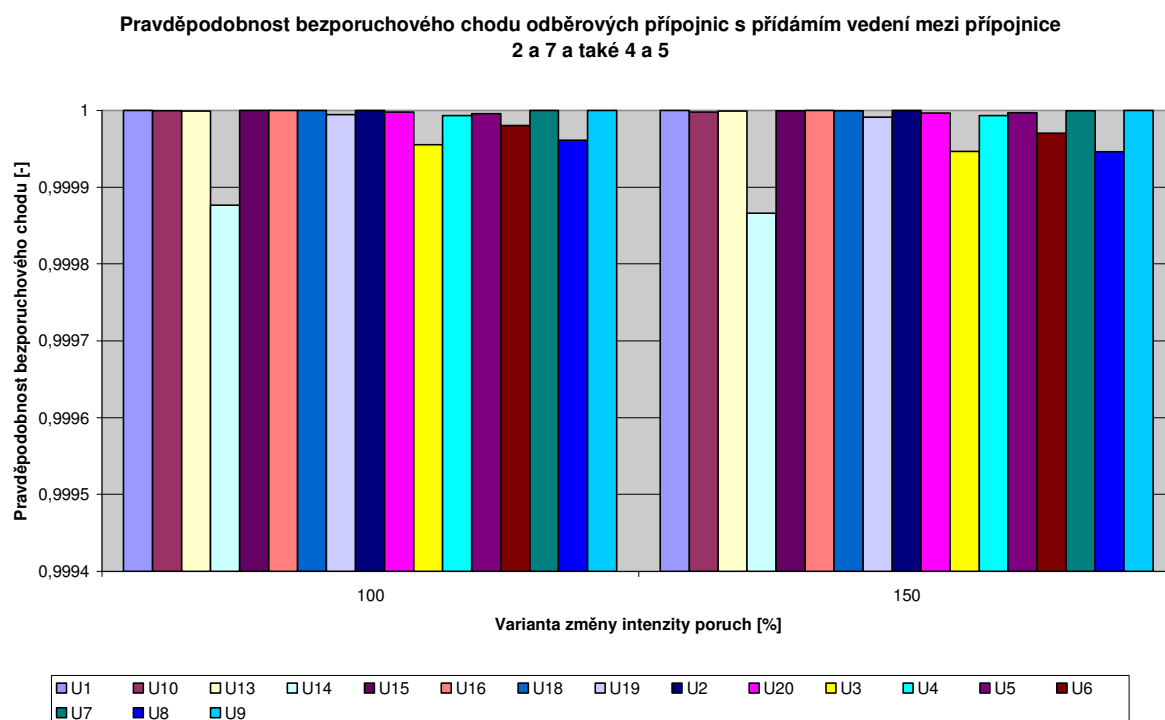
V následujících grafické závislosti popisují pravděpodobnost zvýšení spolehlivosti použitím různých případů jako úpravy spolehlivostního schématu.



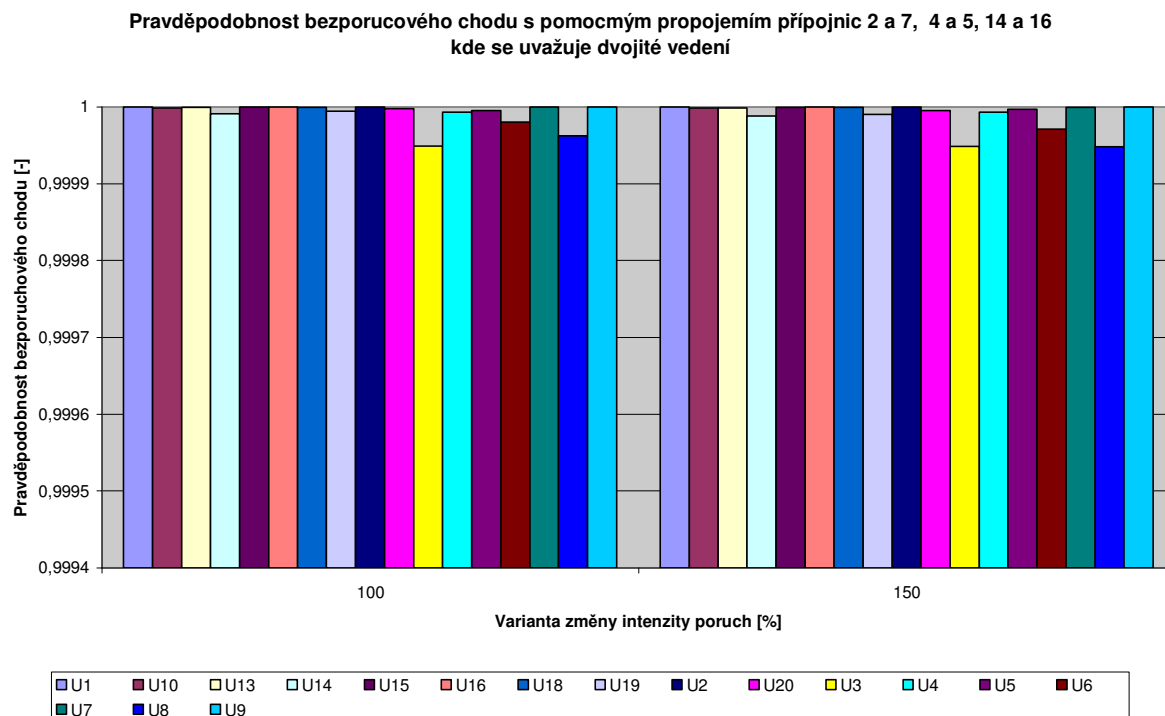
Obr. 5.8. Graf závislosti změny výkonu odběrových přípojníc na pravděpodobnost bezporuchového stavů uzlů s uvažování souběhu vedení pro hodnoty ČEZ 22/80, a se zahrnutím ukazatelů údržby.



Obr. 5.9. Graf pravděpodobnosti bezporuchového chodu (údržba, souběh) s doplněným vedením mezi přípojnice 2 a 7.



Obr. 5.10. Graf pravděpodobnosti bezporuchového chodu (údržba, souběh) s přidáním vedením mezi přípojnice 2 a 7 a také 4 a 5.



Obr. 5.11. Graf pravděpodobnosti bezporuchového chodu s přidáním vedením (údržba, souběh mezi přípojníc 2 a 7, 4 a uvažování dvojitého vedení s vlivem souběhu mezi přípojnícemi 14 a 16.

Obr. 5.8 znázorňuje pravděpodobnost bezporuchového chodu, jestliže navýšíme odebíraný výkon o 20 procent. Tento výkon (3421 MW) mírně převyšuje výkon výrobních jednotek (3405 MW), což vede k viditelnému snížení spolehlivosti. Další zvýšení odběru by mělo znamenat pro simulaci v programu KomlexSpoleh odpojení některých uzlů, tak aby byla splněna podmínka $P_{V \max} > P_{O \max}$.

Další obr. 5.9, 5.10 a 5.11 uvádí grafické závislosti pravděpodobnosti bezporuchového chodu, jestliže do modelu přidáme pomocné vedení mezi přípojnice s nižší spolehlivostí oproti ostatním. Jsou to většinou přípojnice napájené ze dvou stran, u kterých by tato implementace mohla být důsledkem zvýšení úrovně spolehlivosti. Znázorněné grafy tuto úvahu potvrzují.

Ve vyhodnocení grafické závislosti obr. 5.10 byly do spolehlivostního modelu vloženy dvě jednoduchá vedení mezi přípojnice 2 a 7, 4 a 5. Výstupní údaje ze simulace takto zadaného modelu vykazují jako nejméně věrohodnou přípojnicí 14 s hodnotou bezporuchového chodu $R = 0,99877$. V další simulaci bylo do stávajícího modelu doplněno vedení mezi přípojnice 14 a 16, které má stejné poruchové ukazatele jako vedení V23, jelikož mají společnou trasu přenosu (uvažuje se souběh vedení). V obr. 5.11 je znázorněna grafická závislost takto definovaného modelu. Pravděpodobnost bezporuchového chodu přípojnice 14 má hodnotu $R = 0,99991$. Poruchové ukazatele a zatížitelnost doplněných vedení znázorňuje Tab. 5.2. Spolehlivostní model uvádí obr. I a obr.II. v příloze G.

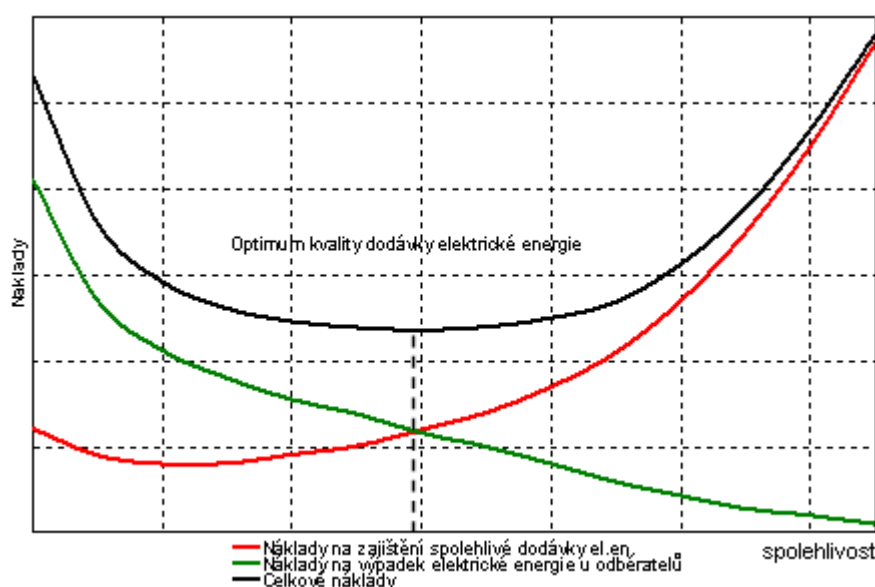
Tab. 5.2 Hodnoty poruchových ukazatelů přidaných vedení

Vedení	Přípojnice		λ_P	τ_P	λ_U	τ_U	Zatížitelnost (MW)
			(rok ⁻¹)	(h)	(rok ⁻¹)	(h)	
V39	U2	U7	0,096	50	0	0	183,35
V40	U4	U5	0,512	3,5	1	102,4	197,6
Souběh vedení							
VH1	U14	U1H	0,891	6	0	0	1040
V23	U1H	U16	0,099	6	1	86,4	570
V23A	U1H	U16	0,099	6	1	86,4	570

5.3 Vyhodnocení jednotlivých variant

V této části práce jsou shrnuty spolehlivosti všech uzlů (odběrových) k jednotlivým simulacím různých variant. Hodnoceny jsou jen odběrové přípojnice, aby byl patrný vliv na dodávku energie odběratelům. V posledním vyhodnocení případu „j” byl stávající model doplněn o vedení, mezi příslušné přípojnice, jejichž hodnota na spolehlivosti měla významnější vliv (nižší hodnotu) oproti ostatním, za účelem vyšší provozní spolehlivosti. Srovnání je uvedeno v tabulce 5.3 a 5.4.

Důležitým prvkem v použití zařízení a při stanovení odpovídající úrovně provozní spolehlivosti jsou spolehlivostní náklady (investiční náklady nezbytné k dosažení určité úrovně spolehlivosti) a spolehlivostní hodnoty (zvýhodnění plynoucí z užitečnosti, ochrany spotřebitele a společnosti) nutné k posouzení energetického systému. Konceptně to znamená, že výhoda vyšší úrovně spolehlivosti dodávky elektrické energie může souviset s náklady na poskytování služeb ke zvýšení úrovně spolehlivosti, jak je patrné z obrázku 5.12.



Obr. 5.12. Náklady na spolehlivost dodávky elektrické energie [17]

Výsledné varianty:

- Podle hodnot RTS s uvažováním vlivu dvojitého vedení bez údržby (obr. 5.2)
- Podle hodnot RTS bez vlivu dvojitého vedení bez údržby (obr. 5.3)
- Podle hodnot směrnice ČEZ 22/80 s uvažováním vlivu dvojitého vedení bez údržby (obr. 5.4)
- Podle hodnot směrnice ČEZ 22/80 bez vlivu dvojitého vedení bez údržby (obr. 5.5)
- Podle hodnot směrnice ČEZ 22/80 s uvažováním vlivu dvojitého vedení a zahrnutím údržbových ukazatelů (obr. 5.6)
- Podle hodnot směrnice ČEZ 22/80 bez vlivu dvojitého vedení a zahrnutím údržbových ukazatelů (obr. 5.7)

- g) Podle hodnot směrnice ČEZ 22/80 s uvažováním vlivu dvojitého vedení a zahrnutím údržbových ukazatelů při navýšeném výkonu o 20% (obr. 5.8)
- h) Podle hodnot směrnice ČEZ 22/80 s uvažováním vlivu dvojitého vedení a zahrnutím údržbových ukazatelů jestliže doplníme model o vedení mezi přípojnici 2 a 7 (obr. 5.9)
- i) Podle hodnot směrnice ČEZ 22/80 s uvažováním vlivu dvojitého vedení a zahrnutím údržbových ukazatelů jestliže doplníme model o vedení mezi přípojnici 2 a 7, 4 a 5 (obr. 5.10)
- j) Podle hodnot směrnice ČEZ 22/80 s uvažováním vlivu dvojitého vedení a zahrnutím údržbových ukazatelů jestliže doplníme model o vedení mezi přípojnici 2 a 7, 4 a 5. Také uvažujeme dvojité vedení a jeho vliv na spolehlivost mezi přípojnici 15 a 16 (obr. 5.11)

Tab. 5.3 Vyhodnocení pravděpodobnosti bezporuchového chodu

Varianta	Pravděpodobnost bezporuchové chodu odběrových přípojníc								
	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9
a	1	1	1	0,999999	0,999999	0,999997	0,999932	0,99996	1
b	1	1	1	1	1	0,999999	0,999993	1	1
c	1	1	1	0,999999	0,999999	0,999999	0,999945	0,999949	1
d	1	1	1	0,999999	0,999999	0,999999	0,999995	1	1
e	1	1	0,999954	0,999478	0,999702	0,99998	0,999655	0,999896	0,999999
f	1	1	0,999947	0,999488	0,999707	0,999981	0,999713	0,999968	1
g	1	0,999999	0,996654	0,99949	0,999714	0,999976	0,999672	0,99683	0,999982
h	1	1	0,999953	0,999504	0,999705	0,999981	1	0,999964	1
i	1	1	0,999956	0,999993	0,999996	0,99998	1	0,999961	1
j	1	1	0,999949	0,999993	0,999995	0,99998	1	0,999962	1

Tab. 5.4 Pokračování, Vyhodnocení pravděpodobnosti bezporuchového chodu

Varianta	Pravděpodobnost bezporuchové chodu odběrových přípojníc							
	U10	U13	U14	U15	U16	U18	U19	U20
a	1	1	0,999999	1	1	1	0,999999	0,999999
b	1	1	1	1	1	1	1	1
c	1	1	0,999999	1	1	1	1	1
d	1	1	0,999999	1	1	1	1	1
e	0,999999	0,999999	0,999874	1	1	0,999999	0,999992	0,999997
f	0,999999	1	0,999884	1	1	1	1	1
g	0,999992	1	0,99989	1	1	1	0,999993	0,999997
h	0,999998	0,999999	0,999884	1	1	1	0,999994	0,999998
i	0,999999	0,999999	0,999877	1	1	1	0,999994	0,999998
j	0,999998	1	0,999991	1	1	0,999999	0,999994	0,999998

První čtyři případy zahrnují model bez uvažování údržby. Přičemž prvních šest variant slouží k porovnání modelu s uvažováním, či neuvažováním vlivu souběhu vedení.

Závěr

Tato diplomová práce se zabývala spolehlivostí elektroenergetických sítí v souvislosti s rekonfigurací. Je zde zpracován rozbor spolehlivosti a uveden postup některých metodik výpočtu elektroenergetických sítí. Dále byl proveden rozbor testovacích sítí RBTS a RTS (79,96), zpracován do tabulek, které uvádí základní ukazatele spolehlivosti, jak pro výrobu, tak přenos elektrické energie. Tyto údaje jsou doplněny kromě dat spolehlivosti o elektrické schopnosti jednotlivých úrovní systému (výroba, přenos), jako jsou výrobní kapacity jednotek a přenosová schopnost vedení. Pro každou testovací síť je vedeno schéma definující zapojení jednotlivých uzlů.

Další část práce se věnuje modelu sítě RTS 79, na kterém se simulovaly výpočty bezporuchového stavu. Byl vytvořen spolehlivostní model pro dvě varianty. Jestliže budeme napájet uzly pomocí jednotlivých vedení, které mají společnou trasu, jde tedy o vedení souběžná, mohou na sebe tyto vedení navzájem působit. To je případ první varianty. Ve většině případů se souběžná vedení považují za nezávislé prvky, což je případ druhé varianty. V podstatě je jistá pravděpodobnost, kdy porucha ovlivňuje obě souběžná vedení. Například vlivem atmosférických vlivů u venkovního vedení.

Jelikož se jedná poměrně o rozměrnou síť, u které by ruční kalkulace znamenaly značnou náročnost, bylo vyhodnocení těchto variant provedeno pomocí metody simulace v programu KomplexSpoleh. Tento program umožňuje zadávat vstupní data pomocí šablony vytvořené v programu Excel. Vstupní údaje se zadávaly podle vytvořeného spolehlivostního schématu, a to podle parametrů uvedených z publikací RTS 79 a také směrnic ČEZ 22/80.

Výstupní data jsou graficky porovnávána, a to jak se zahrnutím odstávek vlivem údržby do spolehlivostního modelu, tak bez nich. Z výstupních hodnot lze konstatovat, že vliv souběhu vedení na spolehlivost má určitý význam, jelikož pravděpodobnost bezporuchového stavu uzlů tímto vlivem klesá. Ovšem také záleží, jaké hodnoty budou pro souběh vedení zvoleny. Ze simulace v programu KomplexSpoleh lze taky odečíst hodnoty poruchovosti pro každý uzel, jako např. roční nedodávku energie, počet výpadků za rok, čas ve výpadku za rok, atd. Všechny provedené simulace jsou doloženy na datovém médiu.

Doplnění modelu o další vedení, za účelem zvýšení spolehlivosti testovací sítě, bylo provedeno v místě, kde se ukázala pravděpodobnost bezporuchového stavu nižší oproti ostatním uzlům. To vedlo ke zvýšení spolehlivosti modelu a snížení roční nedodávky energie. V jednom z případů rekonfigurace spočívala v doplnění modelu o další větev ke stávajícímu vedení s uvažováním vlivu jejich souběhu. Za tohoto předpokladu bylo dosaženo zvýšení spolehlivosti posílených uzlů. Je třeba zmínit, že zvyšování úrovně spolehlivosti vede také ke zvyšování investičních a provozních nákladů. To je ovšem otázka návrhu systému, zda je vyšší úroveň spolehlivosti prioritní.

Z pohledu rozpojení sítě RTS 79 na dva nezávislé systémy v místech spojovacích transformátorů (230kV a 138kV) by nastal přebytek výkonu v síti jedné (230kV) a nedostatek dodávky výkonu v síti druhé (138kV). Nepokrytí odebraného výkopu vede ke snížení spolehlivosti. Je tedy z pohledu spolehlivosti výhodnější provozovat síť jako propojený systém.

Dále je třeba zmínit, že ukazatele směrnice ČEZ 22/80 jsou již zastaralé a neodpovídají aktuálním ukazatelům. Aktualizací a sběrem dat se v současné době zabývá katedra elektroenergetiky VŠB-TU Ostrava.

Literatura a ostatní zdroje

- [1] KLÍMA, Jiří, et al, *Spolehlivost v elektroenergetice*.
1 vyd. CONTE spol., ČVUT Praha ISBN 80-239-6483-6
- [2] KLÍMA, Jiří, et al, *Ekonomika a řízení elektroenergetiky*
1 vyd. Ediční středisko ČVUT, Praha, 1982
- [3] BRIŠ, Radim, *Teorie spolehlivosti*, učební texty pro fakultu aplikované matematiky, 2007, UTB
Zlín
- [4] HRADÍLEK, Zdeněk, *Elektroenergetika distribučních a průmyslových zařízení*.
1. vyd. Ostrava VŠB-TU: MONTANEX, 2008. 388 s. ISBN 978-80-7225-291-6
- [5] RUSEK, Stanislav, *cyklus přednášek pro předmět řízení elektroenergetických soustav*
- [6] BILLINTON, R. et al. *A Reliability Test System for educational Purposes – Basic Data*.
IEEE Transactions on Power Systems, Vol.4, No. 3, August 1989
- [7] BILLINTON, R. et al. *A Reliability Test System for educational Purposes – Basic Results*.
IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5, No. 1, February 1990
- [8] *IEEE Reliability Test Systems*. IEEE Committee Report, IEEE Trans., PAS-98, 1979, pp. 2047-2054
- [9] IEEE Standart 346-1973, *Terms for Reporting and Analyzing Outages of Electrical Transmissions and Distribution Facilities and Interruptions to Customer Service*.
- [10] *IEEE Reliability Test system- 1979*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. Pas-98, A report prepared by the Reliability Test System Task Force of the Application of Probability Methods Subcommittee.
- [11] *IEEE Reliability Test system -1996*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 14, A report prepared by the Reliability Test System Task Force of the Application of Probability Methods Subcommittee
- [12] BILLINTON, R. et al. *Incorporation of DC Link in a Composite System Adequacy Assessment – Composite System Analysis*, IEEE Proc. C, Vol. 139, No 3, May 1992.
- [13] BILLINTON, R. et al. *Effect of Station Originated Outage in a Composite System Adequacy Evaluation of the IEEE Reliability Test System*, IEEE PAS, Vol. 104, No.10, Oct.1985, pp 2649-2656
- [14] Program KomplexSpoleh, Návod k ovládání programu, Katedra elektroenergetiky VŠB-TU Ostrava, Listopad 2008.
- [15] http://www.eon-distribuce.cz/file/cs/electricity/regulations/PPDS_2011.pdf
- [16] http://www.eon-distribuce.cz/file/cs/electricity/technical_information/EON-zprava_o_dosazene_urovni_kvality_distribuce_2011.pdf
- [17] PROKOP, Lukáš, *Spolehlivost dodávky elektrické energie*, Prezentace VŠB-TO Ostrava - FEI
- [18] Allan, R.N, et al. *IEEE Reliability Test System – Extensions to and evaluation of the generating system*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PWRS-1, No.4, November 1986

Seznam obrázků

Obr. 2.1. Spolehlivostní zapojení prvků v sérii	10
Obr. 2.2 Spolehlivostní zapojení prvků paralelně	10
Obr. 2.3. Sériové zapojení.....	14
Obr. 2.4. Sérioparalelní zapojení.....	15
Obr. 2.5 Schéma můstkového zapojení	16
Obr. 3.1. Schéma systému RBTS.....	25
Obr. 3.2. Rozšíření přehledového schématu zapojení RBTS	28
Obr. 3.3. IEEE RTS 79.....	33
Obr. 3.4 IEEE RTS 96 vzniklé spojením tří oblastí (A, B a C).....	39
Obr. 3.5. Schéma rozvodny jedné oblasti systému.....	41
Obr. 4.1 Schéma pro souběžné vedení RTS 79	45
Obr. 4.2. Spolehlivostní schéma horní části (238kV) IEEE RTS 79 uvažováním souběhu vedení	46
Obr. 4.3. Spolehlivostní schéma dolní části (138kV) IEEE RTS 79 s uvažováním souběhu vedení	47
Obr. 4.4 Spolehlivostní schéma horní části (238kV) IEEE RTS 79 bez uvažování souběhu vedení....	48
Obr. 4.5 Spolehlivostní schéma horní části (238kV) IEEE RTS 79 bez uvažování souběhu vedení....	48
Obr. 5.1 Generované schéma programem KomplexSpoleh	50
Obr. 5.2. Graf závislosti intenzity poruch na pravděpodobnost bezporuchového stavu odběrových uzlů pro vliv souběhu vedení.	51
Obr. 5.3. Graf závislosti intenzity poruch na pravděpodobnost bezporuchového uzlů stavu pro jednotlivá vedení bez uvažování souběhu.	51
Obr. 5.4. Graf závislosti intenzity poruch na pravděpodobnost bezporuchového stavů uzlů s uvažováním souběhu pro hodnoty ČEZ 22/80, bez ukazatelů údržby.....	53
Obr. 5.5. Graf závislosti intenzity poruch na pravděpodobnost bezporuchového stavů uzlů s uvažováním souběhu pro hodnoty ČEZ 22/80, bez ukazatelů údržby.....	53
Obr. 5.6. Graf závislosti intenzity poruch na pravděpodobnost bezporuchového stavů uzlů s uvažováním souběhu pro hodnoty ČEZ 22/80, a se zahrnutím ukazatelů údržby.	54
Obr. 5.7. Graf závislosti intenzity poruch na pravděpodobnost bezporuchového stavů uzlů bez uvažování souběhu vedení pro hodnoty ČEZ 22/80, a se zahrnutím ukazatelů údržby.....	54
Obr. 5.8. Graf závislosti změny výkonu odběrových přípojníc na pravděpodobnost bezporuchového stavů uzlů s uvažováním souběhu vedení pro hodnoty ČEZ 22/80, a se zahrnutím ukazatelů údržby. ...	56
Obr. 5.9. Graf pravděpodobnosti bezporuchového chodu (údržba, souběh) s doplněným vedením mezi přípojníc 2 a 7.....	56
Obr. 5.10. Graf pravděpodobnosti bezporuchového chodu (údržba, souběh) s přidaným vedením mezi přípojníc 2 a 7 a také 4 a 5.....	57
Obr. 5.11. Graf pravděpodobnosti bezporuchového chodu s přidaným vedením (údržba, souběh mezi přípojníc 2 a 7, 4 a uvažování dvojitého vedení s vlivem souběhu mezi přípojníc 14 a 16.	57
Obr. 5.12. Náklady na spolehlivost dodávky elektrické energie [17]	59

Seznam tabulek

Tab. 2.1 Výsledné vztahy z generátoru náhodných čísel	21
Tab. 3.1. Rozdělení PQ přípojnic RBTS	25
Tab. 3.2. Údaje spolehlivosti pro výrobní jednotky	26
Tab. 3.3. Údaje spolehlivosti pro dodatečné plynové turbíny	26
Tab. 3.4 Rozmístění výrobních jednotek.....	27
Tab. 3.5 Délky přenosového vedení a délky výpadků.....	27
Tab. 3.6 Údaje pro přenosové vedení.....	28
Tab. 3.7 Informace souběžných vedení.....	29
Tab. 3.8. Roční ukazatele přípojnic.....	30
Tab. 3.9. Maximální hodnoty z přípojnic při použití metody síťového toku	30
Tab. 3.10. Ukazatele pro výrobní jednotky	32
Tab. 3.11. Rozčlenění jednotek do přípojnic.....	32
Tab. 3.12. Jalový výkon generátorů	34
Tab. 3.13. Korekční zařízení napětí.....	34
Tab. 3.14. Doby výpadků	35
Tab. 3.15. Sekce přípojnic.....	36
Tab. 3.16. Statistiky poskytnuté pro elektrické vypínače.....	36
Tab. 3.17. Údaje souběhu vedení	37
Tab. 3.18. Údaje generátorů	40
Tab. 4.1. Vstupní hodnoty spolehlivosti podle 22/80 ČEZ	44
Tab. 4.2. Zadávání uzlů (část tabulky pro ilustraci)	49
Tab. 4.3 Zadávání větví (část tabulky pro ilustraci).....	49
Tab. 5.1 Srovnání ročního ukazatele nedodávky elektrické energie	55
Tab. 5.2 Hodnoty poruchových ukazatelů přidaných vedení	58
Tab. 5.3 Vyhodnocení pravděpodobnosti bezporuchového chodu.....	60
Tab. 5.4 Pokračování, Vyhodnocení pravděpodobnosti bezporuchového chodu.....	60

Seznam příloh

Příloha A.....	Spolehlivostní údaje
Příloha B.....	Údaje RBTS
Příloha C.....	Údaje RTS 79
Příloha D.....	Údaje RTS 96
Příloha E.....	Náklady spojené s výrobou elektrické energie
Příloha F.....	Vstupní a výstupní data programu KomplexSpoleh
Příloha G.....	Spolehlivostní schéma s přidaným vedením